المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم

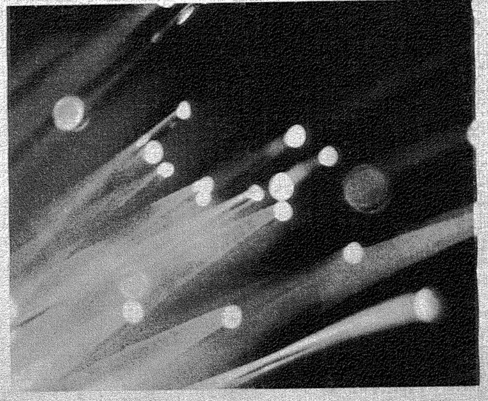
المركز العربي
للتعريب والترجمة والتأليف والنشر

الاتصالات بالألياف البصرية

ترجمة

الأستاذ الدكتور المهندس

جورج صنيج



تدقيق ومراجعة

المهندس أحمد مرسي نفاخ

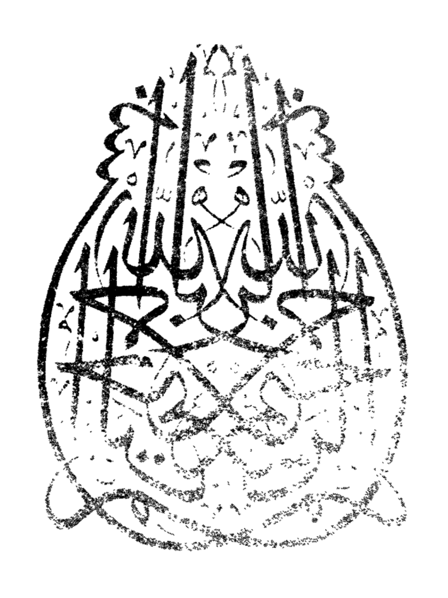
دمشق - ج.ع.س

1992



المركز العربي
للتعريب والترجمة والتأليف والنشر

الاتصالات بالألياف البصرية



﴿ قل هل يستوي الذين يعلمون والذين لا يعلمون ﴾

إهـــــــداء ٢٠٠٨
المركز العربي للتعريب والترجمة والتأليف والنشر
الجمهورية العربية السورية

الاتصالات بالألياف البصرية

Fiber Optic Communications

تاليف

Joseph C. Palais

أستاذ هندسة الكهرباء والحواسب

جامعة اريزونا ـ الولايات المتحدة الأميركية

ترجمة

الأستاذ الدكتور المهندس

جورج صنيج

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

جامعة دمشق

الجمهورية العربية السورية

مراجعة

المهندس

أحمد مرسي نفاخ

B.S.E.E. - M.S.E.E.

عضو الـ H.K.N والـ Φ.H.Σ

I.T.U. - S.EXP.

الدكتورالمهندس جورج صنيج

- بكالوريوس في الهندسية الالكترونية - المعهد العالي الصناعي - شبين الكوم - مصر - 1964 .
- دبلوم هندسة القسم الخاص الالكترونيك - معهد البوليتكنيك الوطني - تولوز - فرنسا 1971 .
- دكتوراه هندسة - جامعة پول ساباتييه - تولوز - فرنسا - 1974 .
- أستاذ في قسم هندسة الالكترونية .

كلية الهندسية الميكانيكية والكهربائيه .

جامعة دمشق .

الجمهورية العربية السورية .

ألّف عدة كتب لصالح جامعة دمشق عن الالكترونيات الصناعية وعن الدارات الالكترونية وتصميمها .

الاتصالات بالالياف البصرية - الطبعة الاولى

ا المركز العربي للتعريب والترجمة والتأليف والنشر

دمشق ص.ب 3752 ج . ع . س

ع 1.1.1992

التنضيد الضوئي .مؤسسة التنضيد التصويري دبس

دمشق ☎ 230965 - 216593

التنفيذ والبلاكات :يوسف ايوبية

دمشق ☎ 332586 - 338927

تصدير

تسعى أقطار وطننا العربي اليوم إلى تطوير وتوسيع بنى اتصالاتها وفقاً لمتطلبات النماء الأساسية العربية الراهنة وذلك بغية مواجهة التغيرات البيئية السريعة . فالظروف السياسية والاجتماعية والاقتصادية التي تمر بها الأقطار النامية والتي تحيط بها ، والتي تعاني جميعاً المشكلات التالية من شح في الغذاء وخدمة صحية غير كافية وبطالة مرتفعة وسوية تعليم منخفضة ، ومعدلات موت عالية وبنى اجتماعية غير متكافئة ، وتوزع غير عادل للثروة مع تعاضد وطني ضعيف ؛ وبغية تحسين نوعية الحياة في العالم النامي ، لا بد من اجراء توزيع عادل للثروة الوطنية ضمن مجتمعاتها وذلك من خلال انجاز برامج تنمية متكاملة تأخذ بشمولها المجتمع بكامله وتؤدي أنظمة الاتصالات في هذا اليوم دوراً رئيساً دون ريب ، وكما هي الحال في كهربة الريف يمكن للاتصالات السلكية واللا سلكية في المناطق الريفية ان تسهم باجراء توزيع عادل للمنافع الاقتصادية والخدمات الاجتماعية .

يعتبر عقد الثمانينات من القرن العشرين عصر التطور في الالكترونيات والاتصالات ويسعى الانسان إلى تخفيض كلفة تأسيس وإنشاء واستثمار القناة الهاتفية لكل كيلومتر وتأتي الاتصالات بوساطة الألياف البصرية ـ والتي تطورت تقنياً وتقانة تطوراً مذهلاً ـ في مقدمة هذه الوساطات التي تحقق الغاية المرجوة واستجابة للحاجة الملحه ، في تزويد أبنائنا طلاب هندسة الاتصالات بالجديد

عن هذا النوع من الاتصالات فقد تم اختيار ترجمة هذا الكتاب الذي يصلح أن يكون كتاباً منهجياً لأبنائنا طلاب السنة النهائية لدرجة التخرج الجامعي في هندسة الاتصالات ، ويصلح في الوقت نفسه أن يكون كتاباً مرجعياً لزملائنا المهندسين في الحقل والمخابر الالكترونية ، وكذلك مقدمة للدراسات العليا والبحث العلمي في موضوع نظم وتقنية الاتصالات بوساطة الألياف البصرية .

والمركز العربي للتعريب والترجمة والنشر ، إذ يشكر كلاً من الأستاذين القديرين الدكتور المهندس جورج صنيج والمهندس أحمد مرسي نفـاخ على قيامهما بمهمة الترجمة والتدقيق العلمي واللغوي ويثني على جهودهما الخيّرة ودأبهما لانجاز هذه الترجمة الرائعة في اللغة العربية ، ليحدوه الأمل أن تعم الفائدة منه كليات جامعاتنا في كافة الأقطار العربية وكذلك العاملين في مؤسسات وهيئات الاتصالات السلكية واللا سلكية في كافة أرجاء وطننا العربي الكبير . وأن نكون جميعاً قد سددنا فراغاً في المكتبة العربية لهذا العلم الحديث والمتطور دوماً .

والله ولي التوفيق وهو من وراء القصد .

الأستاذ الدكتور المهندس
أحمد عمر يوسف
مدير المركز العربي للتعريب
والترجمة والتأليف والنشر

مقدمة المؤلف

تطورت الاتصالات بواسطة الألياف البصرية بسرعة كبيرة وذلك بعد أن تم انتاج ألياف ضعيفة الخسارة لأول مرة في عام 1970 وقد أصبحت أنظمة الليف العملياتية شائعة الآن وتظهر بالتالي مشاريع وتطبيقات جديدة باستمرار ومن المتوقع أن يستمر هذا النمو لعدة سنين . ومع أن تكنولوجيا الألياف لا زالت قيد التطور فإنها قد بحثت بشكل كاف حيث أن العديد من الكتب التي تناولت موضوع الألياف البصرية قد توسعت في التفاصيل النظرية والرياضية وقد يجد المبتدىء مستواها صعباً نسبياً .

عمدنا أن يكون هذا الكتاب أقل صعوبة وأن يقدم إلى القارىء المعلومات الضرورية والنظرية المهمة من غير براهين مطولة . وعلى أي حال شرحت هذه النتائج بتعابير فيزيائية حيثما كان ذلك ممكناً ومناسباً . وقد اعتمدت أشكال وجداول موسعة تجعل هذه النتائج جاهزة للاستعمال بحيث تقدم رؤية واقعية وزودت بقيم عددية لبعض المعلمات النموذجية .

لا يفترض في القارىء أن يكون لديه إلمام ببصريات الألياف أو الاتصالات البصرية . لقد استعملت أبسط مفاهيم الجبر وعلم المثلثات في شرح مميزات أنظمة الألياف . يرد في هذا الكتاب حيثما يحتاج الأمر المواد الأساسية المناسبة عن البصريات والالكترونيات والاتصالات .

تأسس هذا الكتاب على مجموعة من المذكرات التي طورت واستعملت في مقررات قصيرة عديدة عن الاتصالات بالألياف البصرية وقد حصل المشاركون في هذه المقررات على تدريب تراوح من سنتين في مدرسة تقنية وحتى مستوى دكتوراه Ph.D وقد اختلفت أعمالهم من مصمم وحتى رئيس مجلس . وقد ضم الحضور شخصيات من الصناعة والحكومة والاكاديمية باختصاصات فيزيائية وكيميائية وهندسية عديدة .

نحاول في هذا الكتاب كما هو الحال في المقررات القصيرة تقديم اشياء ذات قيمة جوهرية للجميع . ان المهنيين الذين يستفيدون من هذا الكتاب هم المهندسون المصممون الممارسون المعنيون باختيار المركبات وتطبيقاتها وبتصميم الأنظمة وتقويمها . ان معرفة النظام كاملاً مفيد لمصمم الجهاز أيضاً . ويمكن للآخرين المعنيين ببصريات الألياف كالذين يتخذون القرارات الهندسية عالية المستوى ومدراء المشاريع والفنيين والمسؤولين عن التسويق والمبيعات والمعلمين أن يحصلوا أيضاً على معلومات قيمة من هذا الكتاب .

نورد فيما يلي بعض المعلومات عن تنظيم هذا الكتاب . يعرض الكتاب في البدء مخططات إجمالية عن أنظمة ألياف بصرية كاملة فيحدد عناصر نظام ليف بصري ويقدم حافزاً لدراستها افرادياً في الفصول اللاحقة . يحتوي الفصلان 2 و 3 مراجعة عن النتائج الهامة في مجالات البصريات وانتشار الأمواج . وتظهر الحاجة لهذه المعلومات الأساسية لفهم أجهزة وأنظمة الألياف البصرية . أما الفصل 4 الذي يبحث في البصريات المتكاملة يعرِّف بتكنولوجيا تجميع العناصر البصرية على طبقة تحتية مفردة ويقدم من دليل الموجة البصرية المتكاملة نموذجاً مبسطاً ممتازاً لانتشار الضوء في الليف . تتضمن الفصول اللاحقة من 5 إلى 9 الأجهزة الرئيسية التي يحتويها نظام ليف بصري وهي الليف ومنبع الضوء ومكشاف الضوء والقوارن وشبكات التوزيع . ويظهر في الفصول 10 و 11 و 12 اعتبارات النظام ، حيث تغطي هذه الفصول التعديل وآثار الضجيج على نوعية الرسالة وتصميم النظام . يتضمن الفصل الأخير أمثلة عن الأنظمة العملياتية حيث تطبق المعلومات التصميمية التي اتضحت خلال فصول الكتاب في قضايا واقعية .

أتوقع من القارىء الذي استوعب هذه المادة أن يكون قادراً على تصميم وتوصيف الأنظمة وأن يختار ويقوِّم عناصر النظام كالألياف ومنابع الضوء والمكاشيف والقوارن . ستمكن التقنيات المقدمة في هذا الكتاب من تقويم المجموعات الفرعية المتوفرة تجارياً مثل أجهزة الاستقبال وأجهزة الارسال .

كلمة أخيرة هي الاقتراح أن هذا الكتاب يمكن أن يخدم كأساس لمقرر كلية (بدرجة جامعية) في مجال الهندسة أو التكنولوجيا .

مقدمة المترجم

« تعلموا العربية وعلموها للناس »
حديث شريف

لا شك أن المكتبة العربية لا زالت تفتقر كثيراً إلى الكتب العلمية المكتوبة باللغة العربية التي تتطرق إلى مختلف الميادين العلمية النظرية والتطبيقية .

تسعى جامعة الدول العربية ومنظمتها للتربية والثقافة والعلوم من خلال المركز العلمي للتعريب والترجمة والتأليف والنشر لإغناء مكتبتنا العربية ومكتبات جامعاتنا العربية بجميع المراجع العلمية لتعيد إلى الأذهان ما يعترف به أهل العلم وما يؤكده التاريخ من ان التقدم العلمي الحديث يدين بازدهاره للحضارة العربية القديمة .

لقد احتوى هذا الكتاب مواضيع علمية حديثة العهد نسبياً تبحث في الأنظمة الليفية البصرية ومكوناتها من مصادر الضوء والألياف ومكاشيف الضوء والقوارن . وبأسلوب سهل لتكون في متناول جميع السويات العلمية للفنيين وللباحثين على السواء .

ونظراً لقناعتنا بأهمية هذا الكتاب وما يحتويه من معلومات قيّمة عن الأنظمة البصرية الليفية وما فيه من فائدة فقد ترجمناه إلى لغتنا العربية وكان

دعاؤنا ان يوفقنا الله عز وجل بان ننجح في مسعانا وننقل إلى القارىء العربي هذا العلم الحديث بلغة قادرة سهلة ومعبرة التي تمكنت من ان تطيع لها جميع المصطلحات والتعابير العلمية الأجنبية وتستوعب جميع النظريات قديمها وحديثها وجميع ما يستجد من اكتشافات .

بهذا الكتاب نكون قد أسهمنا ، من خلال المركز العربي للتعريب والترجمة والتأليف والنشر وبفضل جهود واهتمامات مديره الأستاذ الدكتور المهندس أحمد عمر يوسف ، في تعويض المكتبة العربية ما ينقصها من كتب علمية عربية يغتني منها من يطلب المعرفة والعلم من أبناء الوطن العربي الكبير وبلغة أبناء هذا الوطن .

لقد تضمن هذا الكتاب ، بالإضافة إلى المواضيع العلمية ، قائمة بالمصطلحات الأجنبية مترجمة إلى معانيها العربية وفق ما وردت في مواقعها العلمية في هذا الكتاب .

أود أن أشكر الأستاذ المهندس أحمد مرسي نفاخ للجهد الكبير الذي بذله بمراجعة الترجمة وتدقيقها .

ونتوجه بكلمة شكر إلى جميع المهتمين في مجال التعريب لنقل العلم والحضارة من جديد إلى ربوع هذا الوطن ونخص بالذكر الأستاذ الدكتور المهندس أحمد عمر يوسف مدير المركز العربي للتعريب والترجمة والتأليف والنشر بدمشق .

الأستاذ الدكتور المهندس
جورج صنيج

الفصل الأول

أنظمة الاتصالات بالألياف البصرية

مقدمة

نعرِّف في هذا الفصل موضوع الاتصالات بالألياف البصرية ونشرح اسلوبنا في عرض هذا الموضوع ونستعرض المزايا العديدة بالمقارنة مع التقنيات البديلة ونناقش التطبيقات المهمة . وحيث أنه قد لا يكون للقارىء خبرة سابقة في بصريات الألياف فإن هذا الكتاب يقدم الاساسيات لمواضيع عدة تعتمد عليها تكنولوجيا الاتصالات بالألياف البصرية وتتضمن : الألياف والبصريات والاتصالات والاتصالات البصرية وأخيراً أنظمة كاملة للاتصالات بالألياف البصرية . نعرض في الفصل الأول الأجزاء الرئيسية لنظام كامل ونَصِف فيما بعد خواص كل جزء وعلاقة الأجزاء ببعضها ، وفي الفصل الأخير نقدم تفاصيل تصميم أنظمة عملية .

(1ـ1) نظرة تاريخية

أين نبدأ مراجعتنا التاريخية ؟ كان الضوء دائماً معنا . فقد حدثت الاتصالات بواسطة الضوء منذ بداية نشوئنا عندما استعمل الانسان الاشارات

اليدوية في اتصالاته ويبدو بوضوح أن هذا شكل من أشكال الاتصالات البصرية ولا يتم هذا في الظلام بل في وضح النهار حيث تكون الشمس في هذا النظام مصدر الضوء ويتم حمل المعلومات من المرسل إلى المستقبل على إشعاع الشمس . تعمل حركة اليد في تعديل الضوء وتكون العين أداة كشف الرسالة فيقوم الدماغ بمعالجتها . يكون نقل المعلومات في نظام كهذا بطيئاً ومسافة الانتشار محدودة وفرص حدوث الخطأ كبيرة . وفي نظام بصري أحدث مفيد من أجل مسافات انتشار أطول كانت الاشارة الدخانية . كانت الرسالة تبعث بواسطة تغيير نمط الدخان الصاعد من النار فينتقل هذا التغير إلى الجهة المستقبلة بواسطة ضوء الشمس . تطلّب هذا النظام وضع طريقة ترميز وتعليمها لمرسل ولمستقبل الرسالة . يمكن مقارنة هذه الطريقة بأنظمة رقمية حديثة تستخدم ترميزاً نبضياً .

في عام 1880 اخترع Alexander Graham Bell نظام اتصالات ضوئي وهو الفوتوفون (Photophone) . فقد استخدم ضوء الشمس المنعكس عن مرآة رقيقة معدّلة صوتياً لتحمل حديثاً . وفي جهة المستقبل اسقط ضوء الشمس المعدل على خلية توصيل ضوئية نوع سيلينيوم حيث حولت هذه الخلية الرسالة إلى تيار كهربائي وقد اكمل هذا النظام بواسطة مستقبل هاتفي ، مع أن هذا النظام قد عمل بشكل جيد إلا أنه لم يحقق نجاحاً تجارياً .

سمح اختراع المصابيح ببناء نظم اتصالات بصرية بسيطة مثل الأضواء الوامضة من أجل الاتصال بين سفينة وسفينة وبين سفينة وشاطىء . وكذلك الأضواء الدوارة في السيارات وأضواء المرور . وفي الحقيقة يعتبر أي نوع من مصابيح الاشارة بشكل أساسي نظام اتصالات بصرية .

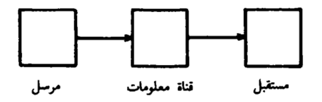
تتصف جميع الأنظمة الموصوفة سابقاً بسعة معلومات صغيرة . ان التقدم المفاجىء الرئيسي الذي قاد إلى اتصالات بصرية عالية السعة كان اختراع الليزر الذي بني أول نظام له عام 1960 . قدم الليزر منبعاً ذا حزمة ضيقة من الاشعاعات البصرية المناسبة لاستعمالها كحامل للمعلومات . يمكن مقارنة الليزرات بمنابع التردد الراديوي المستعملة في الاتصالات الالكترونية التقليدية . وقد طورت أنظمة الاتصالات البصرية غير الموجهة (بدون ليف) بعد فترة قصيرة

من اكتشاف الليزر . وأنجزت بسهولة الاتصالات بواسطة حزم ضوئية تنتشر في الجو . من مساوىء هذه الأنظمة اعتمادها على صفاء الجو وحاجتها إلى ممر خط نظر بين المرسل والمستقبل وكذلك إمكانية حدوث أذى لعين الشخص الذي قد ينظر إلى الحزمة بدون معرفة منه . مع أن استعمال هذه الأنظمة كان محدوداً فإن التطبيقات الأولى لها أدت الى الاهتمام بالأنظمة البصرية التي توجه الحزمة الضوئية وتتغلب على السيئات المذكورة . بالاضافة الى ذلك يمكن للحزم الموجهة ان تنعطف حول الزوايا وان تطمر في الارض . لقد قدم العمل الاولي عن انظمة الليزر الجوية الكثير عن النظرية الأساسية والعديد من المكونات الفعلية المطلوبة للاتصالات بواسطة الالياف .

من المعلوم الآن أن منابع الليزر ليست مطلوبة من أجل جميع الانظمة الليفية . وفي العديد من الحالات يعتبر الثنائي الباعث للضوء LED ذو النطاق الاعرض مناسباً أيضاً . سنناقش في هذا الكتاب أمر اختيار المنبع الضوئي المناسب . في الستينات ما كان قد توفر بعد العنصر الأساسي في نظام ليف عملي وهو الليف الفعال . مع انه قد ثبت انه يمكن توجيه الضوء بواسطة ألياف زجاجية إلا أنها تخمد الضوء بمقدار كبير . وفي السبعينات ظهر الليف منخفض الخسارة الحقيقي الأول وأصبحت الاتصالات بالألياف البصرية عملية .

(1 ـ 2) ـ نظام الاتصالات الاساسي

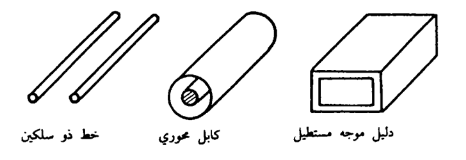
يتألف نظام اتصالات أساسي من مرسل ومستقبل وقناة معلومات كما يبينه الشكل (1 ـ 1) . يتم توليد الرسالة عند مرحلة المرسل وتحويلها الى شكل



شكل (1 ـ 1) ـ نظام اتصالات أساسي

مناسب من أجل النقل خلال قناة المعلومات حيث تنتشر المعلومات من المرسل الى المستقبل خلال هذه القناة . يمكن تقسيم أقنية المعلومات إلى فئتين :

أقنية موجهة وأقنية غير موجهة . يعتبر الجو مثالاً عن قناة غير موجهة حيث يمكن أن تنتشر حولها الأمواج . تشمل الأنظمة التي تستعمل أقنية جوية أنظمة الاتصالات الراديوية والتلفزيونية ووصلات الموجات الميكروية . وتتضمن الأقنية الموجهة منوعات من بنى إرسال ناقلة كما يبين الشكل (1 ـ 2) بعضاً منها وهي : الخط ذو السلكين والكابل المحوري ودليل الموجة المستطيل .

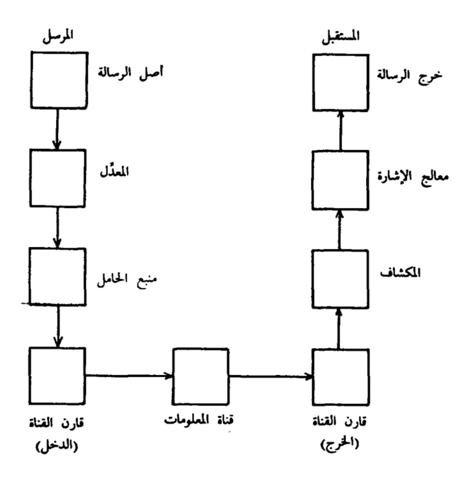


شكل (1 ـ 2) ـ بعض خطوط الارسال الناقلة

تكلف الخطوط الموجهة في تصنيعها وتركيبها وتخديمها أكثر مما تكلفه الأقنية الجوية وتتميز الأقنية الموجهة بسريتها وعدم اعتمادها على الطقس وبقابلية نقل الرسائل ضمن وتحت وحول بنى فيزيائية . تتمتع أدلّة الموجة الليفية بهذه المزايا وبغيرها أيضاً وسنعددها لاحقاً في هذا الفصل ، يجري في جهة المستقبل استخلاص الرسالة من قناة المعلومات ويتم وضعها في شكلها النهائي .

يبين الشكل (1 ـ 3) ـ مخططاً اجمالياً أكثر تفصيلاً إلا أنه لا يزال يعتبر عاماً . ان مناقشة موجزة عن كل كتلة في هذا الشكل تعطينا فكرة جيدة عن العناصر الرئيسية لنظام اتصالات . يبين وصفنا لهذه العناصر ماهو مناسب من أجل أنظمة ليفية مع أن المخطط نفسه يمكن تطبيقه في أنواع أخرى من وصلات الاتصالات .

سيتم التوسع في العديد من الأوصاف المختصرة التي وردت في هذه الفقرة . ونرغب أن نعطي في الوقت الحاضر نظرة شاملة عن الموضوع ونضع الأسس من أجل مناقشات إضافية .



شكل (1 ـ 3) ـ تفاصيل نظام اتصالات عام

أصل الرسالة . Message Origin

يمكن أن يأخذ أصل الرسالة عدة أشكال فيزيائية ويقوم محول طاقة غالباً بتحويل الرسالة غير الكهربائية الى اشارة كهربائية . من الأمثلة الشائعة الميكروفون الذي يحول الأمواج الصوتية الى تيارات كهربائية وكذلك كاميرات

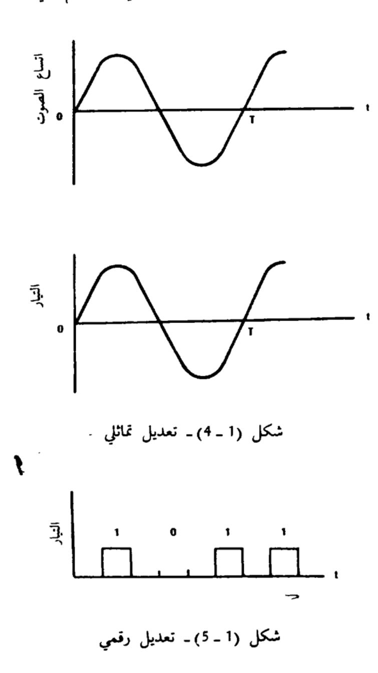
التلفزيون التي تحول الصور الى تيارات كهربائية أيضا . وفي بعض الحالات كما هو الحال في نقل المعلومات بين الحواسيب أو أجزاء من الحاسوب تكون الرسالة بالشكل الكهربائي . وتظهر أيضاً هذه الحال عندما تشكل وصلة ليفية جزءاً من نظام أكبر . تتضمن الأمثلة الألياف المستعملة في الجزء الأرضي من نظام اتصالات فضائية وكذلك الألياف المستعملة في الاشارات التلفزيونية لكابلات الربط . وفي أي حال يجب أن تكون المعلومات بالشكل الكهربائي قبل ارسالها سواء بالاتصالات الالكترونية أو بالاتصالات البصرية .

المعدِّل Modulator

يؤدي المعدِّل وظيفتين رئيسيتين : أولاً يحول الرسالة الكهربائية إلى الصيغة المناسبة وثانياً يحمل الاشارة على موجة مولَّدة بواسطة منبع الاشارة الحاملة . يوجد صنفان مميزان من صيـغ التعديل وهما التعديل التماثلي والتعديل الرقمي . ان الاشارة التماثلية اشارة متواصلة وتعطي من جديد شكل الرسالة الأصلية بأمانة تامة . مثلاً : نفترض أننا نرسل اشارة صوتية تحتوي على نغمة مفردة . عندما يلتقط الميكروفون هذه الموجة يكون للتيار الكهربائي المنتج نفس شكل الموجة ذاتها . ويبين الشكل (1 ـ 4) هذه العلاقة . في هذه الحالة لا يحتاج المعدل ان يغير صيغة الإشارة . قد يكون مناسباً أن نكبر هذه الإشارة وعلى أي حال ستكون قوية بما فيه الكفاية من أجل قيادة منبع اشارة حاملة .

يتضمن التعديل الرقمي نقل معلومات بشكل متقطع كما يوضحه الشكل (1 ـ 5) حيث يوجد هناك اشارة (حالة ON) أو لايوجد (حالة OFF) فالحالة ON تمثل الرقم (1) والحالة OFF تمثل الرقم (0) . وهذه هي الارقام الثنائية أو مايسمى بتّات النظام الرقمي ويكون معدل ارسال المعطيات هو عدد البتات المرسلة خلال ثانية واحدة (bps) . يمكن أن يكون تتابع نبضات ON و OFF ترجمة مرمَّزة لرسالة تماثلية . يقدم المحول التماثلي / الرقمي ترجمة رقمية لرسالة تماثلية . وعند المستقبل تحدث عملية معاكسة حيث ترجع الاشارة الرقمية الى شكلها التماثلي . عند تحميل اشارة رقمية على حامل يحتاج المعدِّل فقط أن يجعل

المنبع في حالة وصل أو قطع في أوقات مناسبة . ان سهولة بناء معدّلات رقمية يجعل هذه الصيغة جذابة جداً لأجل الانظمة الليفية . وستناقش الاعتبارات والمقارنات الاخرى بين الانظمة الرقمية والانظمة التماثلية في هذا الفصل وفي الفصول اللاحقة بتفصيل أكثر . ويكفي أن نقول على أي حال بأن اختيار الصيغة يجب أن يحدد في وقت مبكر جداً في تصميم أي نظام .



شكل (1 ـ 5) ـ تعديل رقمي

في نهاية هذا الفصل نورد قائمة من القرارات التي يواجهها المصم عند إنشاء نظام كامل . وسنوضح بنود هذا الجدول في فصول مختلفة من الكتاب . وسنكون أكثر دقة في وصف الخيارات المتوفرة ونضيف قائمة بالمميزات والمساوىء والتطبيقات الأولية المناسبة لكل خيار .

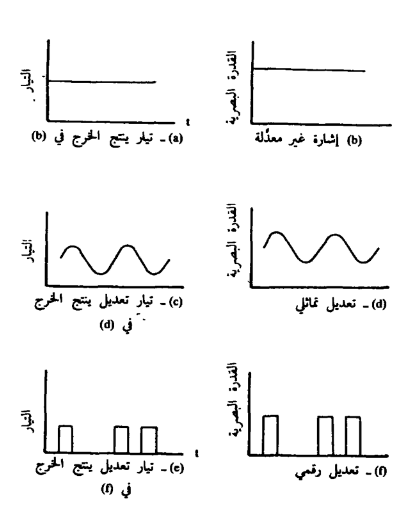
منبع الموجة الحاملة Carrier Source

يولد هذا المنبع الموجة التي تنقل عليها المعلومات وتدعى الموجة الحاملة . يتم انتاج الموجة الحاملة بواسطة مذبذب الكتروني في أنظمة الاتصالات الراديوية . أما من أجل أنظمة الألياف البصرية يستعمل ثنائي ليزر (LD) أو ثنائي باعث للضوء (LED) . يمكن تسمية هذين الجهازين بحق بالمذبذبات البَصرية . من الناحية النظرية تقدم منابع الضوء هذه أمواجاً مستقرة وحيدة التردد بقدرة كافية من أجل الانتشار بعيد المدى .

تختلف الثنائيات الفعلية الليزرية والباعثة للضوء عن هذه الحالة النظرية حيث تبث مدى من الترددات وتشع بصورة عامة قدرة متوسطة من فئة بضعة ميللي واط . وتكفي هذه القدرة في العديد من الحالات وذلك بسبب كون المستقبلات حساسة جداً . على أي حال فإن خسارة الارسال تنقص باستمرار سوية القدرة على طول الليف وهكذا فإن عدم توفر قدرة المنبع الكافية يحد من طول أية وصلة اتصالات . وان عدم توفر منبع وحيد التردد يحط في الواقع أيضاً من أداء النظام ويحدد بالتالي كمية المعلومات التي يمكن أن تنقل خلال طول خط محدد .

ان ثنائيات الليزر والثنائيات الباعثة للضوء صغيرة وخفيفة وتستهلك كميات صغيرة من القدرة وتتمتع نسبياً بسهولة التعديل أي تحميل المعلومات على إشعاعاتها . يعمل كل من هذين الجهازين بواسطة تمرير تيار كهربائي فيه . ويمكن جعل كمية القدرة التي يشعها الجهاز تتناسب مع هذا التيار . وبهذه الطريقة تأخذ قدرة الخرج البصرية شكل تيار الدخل القادم من المعدِّل . يبين الشكل (1 ـ 6) نتائج التعديل التماثلي والرقمي للموجه الحاملة . يجب أن

نوضح ان التغيرات في القدرة البصرية تحتوي المعلومات المرسلة . ويسمى هذا تعديل الشدة IM . ومع أن تيار الاشارة المبين في الشكل (1 ـ 4) ذو اجزاء سالبة وأخرى موجبة فإن قدرة الخرج للثنائي الباعث للضوء موجبة دائماً ويجب ملاحظة هذه الخاصة على الشكل (1 ـ 6) . من أجل تحقيق الخطية يجب أن يكون تيار التعديل الفعلي في نظام تماثلي بكامله موجباً . وبإضافة تيار انحياز مستمر الى إشارة المعلومات المرغوبة يمكن تحقيق هذه النتيجة كما يبدو على الشكل (1 ـ 6) . وبالمثل يكون تيار التعديل في نظام رقمي موجباً دائماً .



شكل (1 ـ 6) ـ تعديل تماثلي ورقمي لموجة حاملة بصرية .

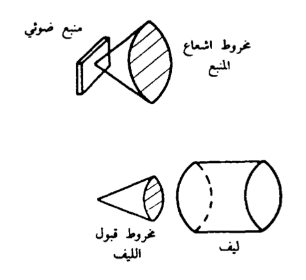
وحيث أن ثنائي الليزر لا يعمل (أي أنه لا يشع) إلا إذا مر فيه تيار عتبة محدد يمكن لتيار التعديل أن يتضمن تيار انزياح مستمر مساوٍ الى قيمة هذه العتبة . يؤدي ظهور العدد الثنائي (1) الى تجاوز التيار قيمة العتبة وجعل الثنائي يبث ضوءاً . بينما يبقى التيار عند العتبة من أجل العدد الثنائي (0) ولا يحدث أي اشعاع . ليس للثنائي الباعث للضوء أية عتبة ويدخل حالة العمل حينما يتدفق فيه تيار موجب .

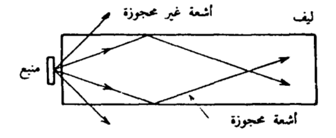
تصنع ثنائيات الليزر LD والثنائيات الباعثة للضوء LED بحيث أنها تشع عند ترددات تكون عندها الألياف الزجاجية مرسلات فعالة للضوء أي حيث يكون تخميد الألياف ضعيفاً . ان هذا في الحقيقة يدعو للسرور لأنه من الصعب الحصول على منابع تبث عند ترددات مختارة . وبدون هذا التواؤم بين تردد المنبع ومدى انخفاض الخسارة في الليف لما وجدت الاتصالات بالألياف البصرية .

قارن القناة (المدخل) Channel Coupler (Input)

سنتطرق الآن الى دارة القارن الذي يقدم القدرة الى قناة المعلومات وهذا العنصر هو الهوائي في نظام اذاعة راديوي أو تلفزيوني . يقوم الهوائي بتحويل الاشارات من المرسل الى قناة المعلومات التي هي الجو في هذه الحالة . أما في نظام موجّه يستعمل أسلاكاً كما هو الحال في وصلة هاتفية يكون القارن فقط عبارة عن موصل بسيط من أجل اقتران المرسل بخط الارسال الذي يستعمل كقناة معلومات . ومن أجل نظام بصري جوي يكون قارن القناة عدسة تستعمل لتسديد ضوء المنبع وتوجيهه متوازياً نحو المستقبل . في نظامنا الليفي يجب أن ينقل القارن بشكل فعال حزمة الضوء المعدَّل من المنبع الى الليف البصري . ولسوء الحظ ليس من السهل انجاز هذا النقل من غير انخفاض كبير نسبياً في القدرة أو استعمال وسائل اقتران معقدة التصميم الى حد ما . وتظهر احدى الصعوبات بسبب صغر حجم الألياف المعروفة حيث تبلغ أقطارها بحدود 50 μm . على أي حال تحدث الخسارة الكبيرة بشكل أساسي لأن منابع الضوء تبعث ضوءها على امتداد زاويّ كبير بينما يمكن للألياف فقط أن تلتقط

الضوء ضمن زوايا أكثر تحديداً . ويوضح الشكل (1 ـ 7) هذا الأمر الذي يبين أبسط نوع من وسائل الاقتران حيث يوضع باعث الضوء مناكباً لليف . وكما يبدو حتى ولو كان الليف كبيراً بما فيه الكفاية ليعترض كل أشعة الضوء المنبعثة من المنبع فإن الضوء لن يُجمع كلياً بسبب الفرق بين زوايا مخروطي الاشعاع والقبول . ويمكن انشاء وسائل اقتران اكثر فعالية الا أنها أكثر تعقيداً . سنأخذ بعين الاعتبار لاحقاً في هذا الكتاب التقويم العددي للكفاءات المتوقعة وتصميم وسائل اقتران مطورة . في الوقت الحاضر سنلاحظ بأن قارن القناة جزء مهم من تصميم نظام ليفي بسبب امكانية حدوث خسارات عالية .





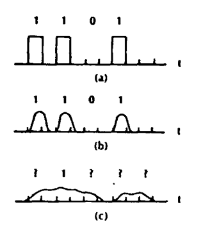
شكل (1 ـ 7) ـ اقتران الضوء بالليف

قناة المعلومات Information Channel

تشير قناة المعلومات الى المسار بين المرسل والمستقبل ففي الاتصالات بالألياف البصرية يكون الليف الزجاجي (أو البلاستيكي) هو القناة . تتضمن الخواص المرغوبة لقناة معلومات تخميداً ضعيفاً وزاوية مخروط قبول ضوئي كبيرة . ان التخميد الضعيف وتجميع الضوء الفعال ضروريان عملياً من أجل الارسال لمسافات طويلة . ومع انه تتوفر مستقبلات حساسة جداً فإن القدرة المسلمة إلى المستقبل يجب أن تتجاوز قيمة ما محددة من أجل الحصول على الرسالة المرغوبة بوضوحية مناسبة .

هناك خاصة أخرى مهمة لقناة المعلومات وهي زمن انتشار الأمواج خلالها . وبصورة عامة يعتمد زمن الانتشار على تردد الضوء وعلى المسار الذي تأخذه الأشعة الضوئية . وتحتوي عادة الاشارة المنتشرة في الليف مجموعة من الترددات البصرية (وذلك لأن المصادر البصرية تبعث بمجموعة من الترددات) وتوزع قدرتها على عدة مسارات للأشعة ويؤدي هذا الى تشوه الإشارة المنتشرة . يظهر هذا التشوه في النظام الرقمي كانبساط النبضات وتغير شكلها كما يبينه الشكل (1 ـ 8) . يزداد الانبساط بازدياد طول المسافة المقطوعة وفي آخر الأمر يصبح الانبساط عظيماً لدرجة ان النبضات المتجاورة تبدأ في التراكب (انظر الشكل 1 ـ 8) وتصبح غير قابلة للتمييز كبتّات منفصلة من المعلومات فينتج آنئذ خطأ في الارسال وحتى نتجنب حدوث هذا الخطأ يجب ارسال النبضات بتواتر أقل . إلا أن هذا بالطبع يحد من معدل ارسال النبضات . ان اعتماد سرعة الموجة على التردد وعلى المسار يسبب تحديداً لمعدل المعلومات سواء أكان التعديل رقمياً أم تماثلياً .

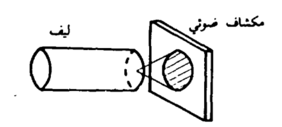
ان المتطلبات متناقضة من أجل زاوية قبول ضوئية كبيرة وتشوه اشارة منخفض . تمثل الألياف العملية حلاً وسطاً بين هاتين النوعيتين . من أجل أنظمة ذات طول خطوط ومعدل معلومات متواضع يمكن الحصول على ألياف بقيم مناسبة من زاوية القبول وتشوه الاشارة . سنعرض في هذا الفصل لاحقاً أنواعاً مهمة أخرى من الألياف .



شكل (1 ـ 8) ـ نبضات بصرية منبسطة . (a) قطار النبضات الأصلية . بعد مسيرها مسافة ما يزداد عرضها كما في (b) ويؤدي الانتشار الاضافي الى اندماج النبضات المتجاورة (c) وتملأ الشقوق الخاصة بالأرقام (o) فتظهر الآن أخطاء عديدة لدى كشف هذه الاشارة .

قارن القناة (المخرج) Channel Coupler (Output)

في نظام اتصالات الكتروني جوي يجمع الهوائي الاشارة من قناة المعلومات ويوجهها نحو المستقبل . وفي نظام ليفي يوجه قارن الخرج الضوء المنبثق من الليف نحو مكشاف الضوء ويشع هذا الضوء بنمط مماثل لمخروط قبول الليف وحيث أن المكاشيف الضوئية الشائعة ذات مساحة سطح كبيرة وزوايا قبول واسعة فانه يتم بشكل فعال استخلاص الضوء من الليف بواسطة طرف اتصال بسيط كما يبينه الشكل (1 ـ 9) .

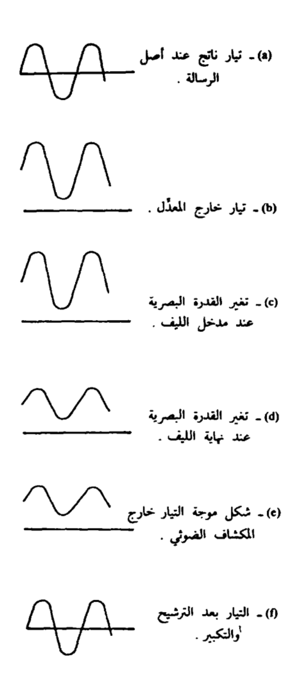


شكل (1 ـ 9) ـ ان الاقتران من الليف إلى مكشاف ضوئي فعال جداً ، ويمكن أن يقبل المكشاف معظم الضوء المشع من الليف .

المكشاف Detector

يمكن للمعلومات المرسلة أن تستخلص من الموجة الحاملة . في النظم الالكترونية تدعى هذه العملية بإزالة التعديل ويمكن انجازها بواسطة دارة الكترونية مناسبة . وفي النظم البصرية يتم تحويل الموجة البصرية الى تيار كهربائي بواسطة مكشاف ضوئي . تستعمل حالياً بشكل شائع ثنائيات ضوئية من انصاف النواقل من مختلف التصاميم . ويتناسب التيار الناتج في هذه المكاشيف مع قدرة الموجة البصرية الواردة . وحيث ان تغيرات القدرة البصرية تحتوي المعلومات المرغوبة فإن تيار خرج المكشاف يحتوي هذه المعلومات وهذا التيار يماثل التيار المستعمل في قيادة منبع الموجة الحاملة . ويوضح الشكل (1 ـ 10) العلاقة بين الاشارات عند نقاط مختلفة في النظام من أجل اشارة تماثلية . ويبين الجزء (a) شكل التيار المتولد بواسطة مبدل الطاقة عند الرسالة الأصلية وهذه هي اشارة المعلومات التي نرغب بإرسالها . يضيف المعدِّل تيار انحياز ثابت الى هذا التيار كما يبدو في الجزء (b) من الشكل (1 ـ 10) ويطبق الناتج الى حامل الضوء ويحتوي الآن شكل موجة القدرة الحاملة كما في الجزء (c) المعلومات المرغوبة وتتخامد الاشارة أثناء انتشارها خلال الليف كما تبينه الطاقة البصرية المتناقصة في (d) . تم رسم هذا الشكل بافتراض تشوه موجة مهمل نتيجة الانتشار على طول الليف . يحول المكشاف شكل الموجة البصري الى شكل كهربائي كما يبينه الجزء (e) . ومن أجل اكمال الارسال يجري ترشيح تيار خرج المكشاف لكي يزول الانحياز الثابت وتكبير هذا التيار اذا احتاج الأمر . يتم إنجاز هاتين الوظيفتين الأخيرتين في مجموعة معالج الإشارة في نظامنا هذا . أما النتيجة المبينة في الجزء (f) هي شكل موجة المعلومات المرغوبة ويمكن رسم مجموعة مشابهة من الأشكال من أجل نظام رقمي وستظهر النتيجة تكرار تتابع نبضة الدخل عند خرج المكشاف .

تشمل المميزات المهمة للمكاشيف الضوئية الحجم الصغير والاقتصادية والعمر الطويل واستهلاك قدرة منخفض وحساسية عالية للاشارات البصرية واستجابة سريعة للتغيرات السريعة في القدرة البصرية . ولحسن الحظ تتوفر مكاشيف ضوئية لها هذه الخصائص .



شكل (1 ـ 10) ـ الاشارات عند نقاط مختلفة من نظام تماثلي

معالج الإشارة Signal Processor

يتضمن معالج الاشارة تكبير وترشيح الاشارة في أنظمة ارسال الاشارة التماثلية . وبالإضافة الى ترشيح الانحياز الثابت يجب منع أي ترددات أخرى غير مرغوب فيها من الاستمرار في الانتقال . يمرر المرشاح المثالي كل الترددات التي تحتويها المعلومات المرسلة وينبذ جميع الترددات الأخرى فيحسن هذا وضوحية الارسال المطلوب . يزيد الترشيح المناسب نسبة قدرة الاشارة الى القدرة غير المرغوبة حتى القيمة العظمى . ويسمى التراوح العشوائي في الاشارة المستقبلة بالضجيج . فالضجيج موجود في جميع أنظمة الاتصالات . سنتعلم كيف نقدر كمية الضجيج في نظام ليفي وكيف نصمم أنظمة ليفية توافق متطلبات نسبة الاشارة الى الضجيج (SNR) من أجل تطبيق محدد .

يمكن أن يحتوي المعالج في نظام رقمي دارات قرار بالاضافة الى المكبرات والمراشيح . تقرر دارة القرار فيها اذا كان قد استقبل عدد ثنائي (1) أو (0) خلال الشق الزمني لأي بتّة مفردة . وبسبب الضجيج الذي لا يمكن تجنبه سيكون هناك بعض الاحتمال لحدوث خطأ في هذه الطريقة . يجب أن يكون معدل الخطأ في البتّات (BER) صغيراً جداً من أجل اتصالات ذات نوعية عالية . وعلى معالج الاشارة الرقمية أيضاً أن يفك ترميز التتابع الوارد من الاصفار والواحدات اذا كانت الرسالة الأصلية تماثلية . ويتم هذا بواسطة محول رقمي تماثلي فينتج من جديد الشكل الكهربائي الأصلي للمعلومات . وإذا كانت الاتصالات بين آلات يجب أن يكون الشكل الرقمي مناسباً لكي يستعمل بدون التحويل الرقمي التماثلي .

خرج الرسالة Message Output

إن ما يعنينا هنا حالتان مختلفتان . في الحالة الأولى يتم عرض الرسالة على شخص ما بحيث يرى أو يسمع المعلومات . من أجل تحقيق هذا يجب تحويل الاشارة الكهربائية الى موجة صوتية أو صورة مرئية . ومن أجل إنجاز هذه التحويلات تستخدم مبدلات طاقة مناسبة وهي المجهار من أجل الرسائل

الصوتية وانبوبة الأشعة المهبطية من أجل الصور وهي مشابهة لتلك المستعملة في التلفزيون .

وفي الحالة الثانية يستعمل مباشرة الشكل الكهربائي للرسالة الخارجة من معالج الاشارة وتحدث هذه الحالة على سبيل المثال عندما توصل حواسيب أو آلات أخرى الى نظام ليفي . ويحدث هذا أيضاً عندما يكون النظام الليفي فقط جزءاً من شبكة أكبر كما هو الحال في وصلة ليفية بين مقاسم هاتفية أو في خط وصلة رئيسية حاملة لعدد من البرامج التلفزيونية . وتتضمن المعالجة في هذين النظامين الأخيرين توزيع الاشارات الكهربائية الى الأماكن المقصودة المناسبة . تكون أداة خرج الرسالة بكل بساطة عبارة عن موصل كهربائي من معالج الإشارة الى النظام التالي .

سنهتم في هذا الكتاب فقط بدارات معالجة الاشارة وأجهزة خرج الرسالة لأن هذه العناصر هي نفسها المستخدمة في الأنظمة غير البصرية .

بعض الارقام

حتى الآن يوجد نقص ملحوظ في الارقام المرتبطة بمناقشاتنا إلا أنه يجب تصحيح هذا الإغفال اذا كنا نأمل أن نفهم ونصمم نظم اتصالات . يبين الجدول (1 ـ 1) الوحدات التي تظهر غالبا في هذا الكتاب من أجل الرجوع اليها . ويعتمد هذا الكتاب حيثما أمكن نظام MKSC (متر ـ كيلوم غرام ـ ثانية ـ كولومب) . ويعبر دائما تقريبا عن أقطار واطوال الالياف بالمتر . يوجز الجدول (1 ـ 2) بعضا من الثوابت الفيزيائية المهمة في دراستنا للبصريات الليفية .

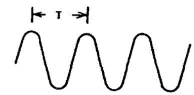
جدول (1 ـ 1) الوحدات

الوحدة	الرمز	القياس
متر	m	طول
كيلو غرام	kg	كتله
ثانية	s	زمن
كولومب	C	شحنة
جول	J	طاقة
وات	W	قدرة
هرتز	Hz	تردد
نيوتن	N	قوة
أمبير	A	تيار
درجة كلفن	°K	درجة حرارة
درجة سيلسيوس	°C	درجة حرارة
فاراد	F	سعة
أوم	Ω	مقاومة

جدول (1 ـ 2) ثوابت

الوصف	القيمة	الرمز
سرعة الضوء	3×10^{8} m/s	c
ثابت بلانك	6.626×10^{-34} J×s	h
شحنة الالكترون	-1.6×10^{-19} C	− e
ثابت بولتزمان	1.38×10^{-23} J/°K	k

تكافىء وحدة التردد (هرتز) دورة ذبذبة واحدة في الثانية ويدعى الزمن الفاصل بين ذروتين متتاليتين للذبذبات بالدور ويعطى قيمة معاكسة لتردد الموجة أي ثانية لكل دورة (المتعاكسة مع دورة في الثانية) . اذا كان تردد الموجه f ودورها T يكون عندئذ $T=1/f$ وهذا مايوضحه الشكل (1 ـ 11) . في أنظمة الاتصالات البصرية نقابل ترددات تتراوح من بضعة هرتز وحتى اكثر من 10^{14} هرتز ونتعامل أيضاً مع أطوال تتراوح بين جزء من المليون من المتر وعشرات الكيلومترات . لذلك من المناسب ان نتعلم بعض السابقات المعيارية من أجل الكميات الكبيرة جداً والصغيرة جداً . يبين الجدول (1 ـ 3) بعضاً منها .



شكل (1 ـ 11) ـ موجة ذات دور T ثانية . يكون التردد المطابق $f = 1/T$

جدول (1 ـ 3) . سابقات .

السابقة	الرمز	عامل الضرب
Giga	G	10^{9}
Mega	M	10^{6}
Kilo	k	10^{3}
Centi	c	10^{-2}
Milli	m	10^{-3}
Micro	μ	10^{-6}
Nano	n	10^{-9}
Pico	p	10^{-12}
Femto	f	10^{-15}

ان اطوال الموجة الضوئية هي من فئة الميكرو متر ($1\ \mu m=10^{-6}\ m$) وهناك وحدة أصغر لقياس الطول وهي النانومتر وتساوي ($1\ nm=10^{-9}m$) .

سنناقش فيما يلي بعض الخواص العددية المهمة لنظم رقمية وتماثلية عامة . يوجز الجدول (1 ـ 4) متطلبات عرض النطاق لعدة انظمة تماثلية . فالوصلات الهاتفية تحتاج فقط ان ترسل الرسائل بترددات حتى 4000 Hz وذلك لان معظم الطاقة في الكلام العادي تحتويها الترددات التي تقع دون هذه القيمة . تكون الرسائل واضحة والاصوات الفردية قابلة للتمييز تماما من أجل عرض النطاق هذا . ويمكن ان تنتج الأقنية ذات عرض النطاق الاكبر أصواتا اكثر جودة الا أن هذا ليس ضروريا في دارات الهاتف العملية ويمكن ان ينقص عرض النطاق عن 4 kHz اذا سمح بتدني جودة الكلام . ومن أجل معظم أمثلة الارسال الصوتي الواردة في هذا الكتاب سنفترض استعمال عرض نطاق 4 kHz في أنظمة الهاتف التجارية . ويدعى مدى الترددات حتى 4 kHz النطاق الأساسي للرسالة الصوتية . ترسل محطات الاذاعة التجارية ذات التعديل المطالي (AM) الرسائل بدءاً من 100 Hz وحتى 5000 Hz. وتتطلب صيغة AM عرض نطاق مساوٍ الى ضعفي أعلى تردد تعديل وهكذا فان محطات AM تملك عرض نطاق يبلغ 10 kHz . وتتباعد تردداتها الحاملة بقيمة 10 kHz . يتطلب انتاج موسيقي عالي الجودة أن يكون الارسال على ترددات تعديل تصل حتى 15 kHz (تتمكن أذنٌ جيدةُ الاستجابة على وجه الخصوص ان تكشف تذبذبات أسرع تقارب 20 kHz). وترسل محطات الاذاعة ذات التعديل الترددي (FM) عرض نطاق يساوي 200 kHz من أجل تحقيق هذه النتيجة .

جدول (1 ـ 4) أنظمة تماثلية عامة

نوع الرسالة	عرض النطاق	تعليقات
صوت	4kHz	قناةهاتفية مفردة
موسيقى	10kHz	محطة اذاعة راديو AM
موسيقى	200kHz	محطة اذاعة راديو FM
تلفزيون	6MHz	محطة اذاعة تلفزيونية

وحيث ان اشارات الصورة تحتوي معلومات اكثر مما تحتويه الاشارات الصوتية فانها تتطلب عرض نطاق إضافي للإرسال. وفي أقنية التلفزيون التجارية يبلغ عرض النطاق 6 MHz ويحتوي كلا من الصورة والصوت . يبلغ أعلى تردد رؤية مرسل فعلياً حوالي 4.2 MHz . وان المجال من الترددات الذي تشغله اشارة تلفزيونية (حتى 6 MHz) هو النطاق الاساسي لرسالة تلفزيونية .

عندما ترسل اشارة تماثلية رقميا يعتمد معدل البتّات على معدل اعتيان الاشارة التماثلية وعلى نظام الترميز . وبحسب نظرية الاعتيان يمكن ان ترسل اشارة تماثلية بدقة اذا تم اعتيانها بمعدل يساوي على الأقل ضعفي اعلى تردد تحتويه تلك الاشارة . ومن أجل هذا السبب يتم اعتيان قناة هاتفية معيارية 4 kHz بمعدل 8000 عينة بالثانية . وتستخدم إجراءات الترميز ثمانية بتّات من أجل وصف مطال كل عينة وهكذا يبلغ مجموع ما يرسل 64000 bps من أجل رسالة هاتفية مفردة . ويمكن بواسطة إرسال نبضات بمعدل أعلى من 64000 bps أن ترسل عدة رسائل في وقت واحد . تضم الرسائل المختلفة على قناة معلومات مفردة وذلك بترتيب بتّات معطياتها عند المرسل . ثم تفصل هذه الرسائل عند المستقبل . يمكن إضافة وظيفتي الضم والفصل على المخطط الاجمالي في الشكل (1 ـ 3) . يبين الجدول (1 ـ 5) معدلات المعلومات الهاتفية المعيارية ودلالاتها وعدد الاقنية اللازمة . وكمثال تكون المجموعة الاساسية هي نظام T1

(الارسال عند السوية 1) وتحمل هذه السوية 24 رسالة صوتية . وعندما يستخدم التشوير الرقمي (ارسال الاشارة رقميا) تناسب لاجل هذه الدلالة DS -1 (اشارة رقمية عند السوية 1) . وتشكل السوية T2 بواسطة ضم أربعة انظمة T1 فيساوي عدد الرسائل التي يمكن حملها عندئذ : 96=(24)4 رسالة . وبالمثل تكون جميع السويات الأخرى التي هي أعلى من السوية الأولى مجموعات من أنظمة ذات سوية أدنى . اذا نظرنا بامعان الى معدلات المعطيات لكل سوية نجد بانه يرسل عدد من بتّات المعطيات اكثر مما هو مطلوب من أجل الرسائل فقط . مثلا : يتطلب نظام T3 معدلا يساوي : (64000)672 أي 43 Mbps . أما المعدل الفعلي وهو 44.736 Mbps فيتضمن نبضات التزامن والتشوير .

جدول (1 ـ 5) معدلات الارسال الرقمية المعيارية لنظام هاتفي في الولايات المتحدة

عدد الأقنية الصوتية	دلالة الارسال	دلالة التشوير	معدل المعطيات
1			64 kbps
24	T1	DS-1	1.544 Mbps
(أنظمة 2 T1) 48	T1C	DS-1C	3.152 Mbps
(أنظمة 4 T1) 96	T2	DS-2	6.312 Mbps
(أنظمة 7 T2) 672	T3	DS-3	44.736 MbPs
(أنظمة 2 T3) 1344	T3C	DS-3C	91.053 Mbps
(أنظمة 6 T3) 4032	T4	DS-4	274.175 Mbps

يمكن بسهولة تحديد معدل البيانات الضروري من أجل ارسال رقمي في بث تلفزيوني تجاري . ان الاشارة التماثلية ذات عرض نطاق 6 MHz . وان الاعتيان عند ضعفي هذا المعدل والترميز بثمانية بتّات لكل عينة يتطلب معدل

معطيات يساوي 2(6)(8)=96 Mbps . فاذا ضُم عدد من هذه الاشارة في ليف واحد سيكون معدل المعطيات بضع مئات Mbps . وحيث ان عرض النطاق لمعلومات الصورة أقل من 6 MHz يمكن عندئذ تنقيص المعدل 96 Mbps . فمثلاً إذا قبلنا عرض نطاق يساوي 4.5 MHz ومعدل اعتيان يساوي ضعفي هذا الرقم وبترميز يستخدم تسعة بتّات لكل عينة يعطي هذا معدل معطيات يساوي 81 Mbps . ومن أجل خط صوتي مرافق يغطي 15 kHz وباعتيان 30 kbps ومرمِّز يستعمل8 بتّات لكل عينة يتطلب هذا معدل 240 kbps . ويكون معدل ارسال الاشارة من أجل هذا النظام 81.24 Mbps . يمكن بسهولة ارسال هذه الاشارة عبر خط هاتفي DS -3C معياري يعمل على معدل معطيات يساوي 91.053 Mbps .

لقد ثبتت الآن العلاقة بين عرض النطاق ونوع الرسالة من أجل شبكات اتصالات عامة . ان الارسال الذي يتضمن معطيات من حاسوب أو ساتل يتطلب عرض نطاق يعتمد على المعدل المرغوب من نقل المعلومات . تذكّر أن عرض النطاق والمعدلات التي نوقشت هي من خصائص الرسالة ولا تعتمد على نوع الارسال المستعمل . وتتطلب الانظمة البصرية وأنظمة التردد الراديوي نفس عرض النطاق ومعدلات المعطيات من أجل نقل نفس الرسائل .

نرغب عند هذه النقطة أن نعطي القارىء بعض الأفكار عن سهولة (أو صعوبة) تصميم وبناء واختبار نظام ليفي ذي معدل معطيات محدد . وكما هو متوقع تزداد الصعوبات بازدياد معدل المعطيات . ان التصنيفات النوعية المتبعة هي كيفية إلا أنها مفيدة . إن الأنظمة الليفية التي تعمل بمعدل أقل من 100 kbps تكون ذات معدل ارسال منخفض . ويمكن لمثل هذه الأنظمة أن تبنى بسهولة وبكلفة بسيطة وذلك من العناصر البصرية والالكترونية المتوفرة . أما من أجل معدلات بين 100 kbps و 10 Mbps يرفع هذا فقط الى حد ما من كلفة وصعوبة الانجاز وهذا هو مدى متواضع من معدل المعلومات . ومن أجل 10 Mbps وحتى أكثر من 100 Mbps بقليل يجب استعمال دارات وباعثات ضوء ومستقبلات ضوء متطورة . وبالرغم من الكلفة والصعوبات يشيع استعمال الأنظمة في هذا المجال كما تشهد عليه الأنظمة الليفية العاملة عند هذه المعدلات

العالية . أما المدى من بضعة مئات Mbps وحتى 1000 Mbps فهو مرتفع جداً ويتطلب اهتماماً ونفقات اضافية . فالعناصر البصرية القادرة على بث وكشف مثل هذه السرعات الكبيرة مكلفة وكذلك فإن دارات الاقتران الالكترونية صعبة البناء . ويمكن الحصول على عناصر ونظم تعمل عند اكثر من 1000 Mbps . فمثل هذه المعدلات العالية جداً تُعتمد في الأنظمة المعقدة والضخمة جداً . وتكون كمية المعلومات المنقولة عند معدلات كهذه أكثر بكثير من الكمية التي سيتعامل بها معظمنا في أي وقت .

من أجل وصلة تماثلية يعبر عن نوعية ارسال الاشارة بنسبة قدرة الاشارة S الى قدرة الضجيج N . فالضجيج موجود في جميع أجهزة الاستقبال لذلك فإن نسبة الإشارة الى الضجيج لا تساوي أبداً اللا نهاية . وتتطلب صورة تلفزيونية جيدة وواضحة نسبة اشارة الى ضجيج أفضل من 10000 . فعند قيم أقل من هذه تصبح الصورة غائمة وتتدنى الوضوحية والتباين نتيجة الضجيج . وكذلك فإن اشارات صوتية وموسيقية مقبولة تتطلب نسب إشارة الى ضجيج أعلى من أجل استقبال جيد .

في نظام رقمي قد يترجم جهاز الاستقبال الرقم (1) المرسَل كرقم (0) أو قد يحس بالرقم (0) كرقم (1) وهذا ما يسببه ضجيج النظام . تقوّم هذه النوعية لنظام رقمي بما يسمى معدل خطأ البتات (BER) . فقيمة BER من فئة 10^{-9} تعني بأنه فقط بتة واحدة قرئت خطأ من أصل كل بليون بتة مرسلة . فمعدل 10^{-9} (أو أفضل منه) يعتبر متوفراً على الخطوط الهاتفية الرقمية المعيارية التي ترسل معطيات وكذلك رسائل صوتية . فالمعطيات تحتاج هذه الدرجة من الدقة . والكلام يمكن أن يستقبل بمعدل خطأ يبلغ عدة مرات أكبر من 10^{-9} قبل أن يكتشف المستمع تدني في جودة الاستقبال .

يجب أن تظهر إشارة بصرية قوية عند المستقبل إذا تحققت نسب إشارة الى ضجيج عالية أو معدل خطأ بتّات منخفض . تستخدم الأرقام التي استعرضناها في هذه الفقرة من أجل تقويم الأجهزة والأنظمة التي نصادفها في بقية كتابنا هذا .

حساب سويات القدرة بالديسيبل (dB) :

ان جزءاً رئيسياً من تصميم الأنظمة يتضمن المحافظة على قيمة القدرة البصرية على طول وصلة الاتصالات وهذا ضروري عادة من أجل أن نضمن بأن الموجة الواردة الى المكشاف ذات شدة كافية من أجل أن تميز بشكل صحيح وبوضوح . في حالات أخرى قد تكون القدرة المستقبلة كبيرة جداً من أجل المستقبل . ويجب على المصمم أن يتأكد أن هذا لا يحدث . يعتبر الديسيبل (dB) مقياساً مناسباً لسويات القدرة النسبية في نظام اتصالات . إذا كانت القدرة عند نقطة ما في نظام تساوي P_1 وات وعند نقطة اخرى أبعد في الوصلة كانت P_2 وات . تمثل عندئذ P_2/P_1 جزءاً من القدرة المرسلة بين النقطتين وبكلمات أخرى تحدد P_2/P_1 كفاءة الإرسال بين النقطتين ، ويعبر عن هذه النسبة بالديسيبل :

$$dB = 10 \log_{10} (P_2/P_1) \qquad (1-1)$$

وتعطى P_2 و P_1 نفس الوحدات (وات أو ميللي وات مثلاً) ويكون لوغاريتم الأعداد التي هي أصغر من الواحد سالباً وهكذا تكون نتيجة الديسيبل سالبة إذا كانت P_2 أقل من P_1 . وهذه هي الحالة عندما يكون للنظام خسارات . وعندما يكون P_2 أكبر من P_1 (كما هي الحالة عندما يوضع مكبر بين موقعين) يكون الديسيبل موجباً .

إن المقياس اللوغاريتمي ملائم للاستعمال بسبب السهولة التي بها يمكن ايجاد التغير الكلي في سوية القدرة عندما تربط عدة عناصر متشلشلة (cascaded) . لنعتبر النظام المكون من ثلاثة عناصر والمبين في الشكل (1 ـ 12) . يمكن أن تمثل الكتل الثلاثة قارناً من منبع الضوء إلى الليف والليف ذاته والموصل . وتحدد قدرة الخرج بضرب كفاءات الكتل كما يوضحه التعبير التالي :

$$\frac{P_4}{P_1} = \frac{P_4}{P_3} \times \frac{P_3}{P_2} \times \frac{P_2}{P_1}$$

P_1 —□— P_2 —□— P_3 —□— P_4

شكل (1 ـ 12) ـ سويات القدرة في نظام متسلسل (cascaded)

ويعبر عن الخسارة كما يلي :

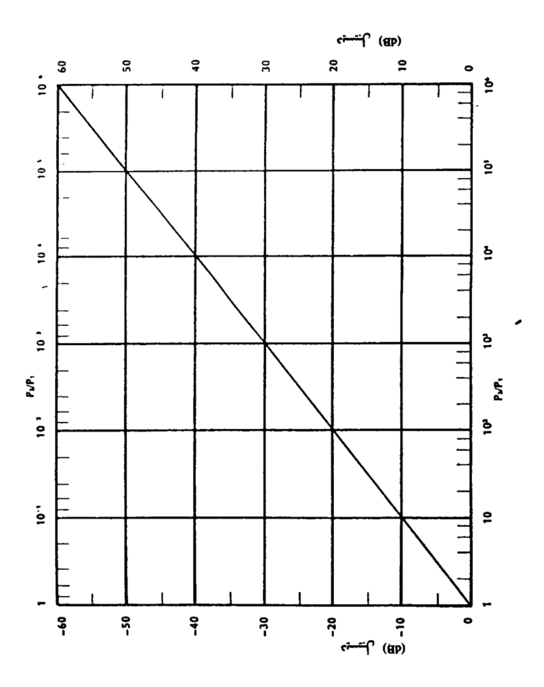
$$dB = 10 \log_{10} \frac{P_4}{P_1} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_4}{P_3} \times \frac{P_3}{P_2} \times \frac{P_2}{P_1} \right)$$

وإذا استعملنا الخاصة بان لوغاريتم جداء حدود يساوي مجموع لوغاريتمات هذه الحدود نجد :

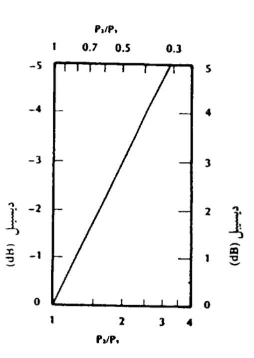
$$dB = 10 \log_{10} \frac{P_4}{P_3} + 10 \log_{10} \frac{P_3}{P_2} + 10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} \qquad (2\text{-}1)$$

وهذا يعني ان الكفاءة الإجمالية بالديسيبل تساوي مجموع الكفاءات بالديسيبل وهذا يوضح الميزة الرئيسية للمقياس اللوغاريتمي .

يمكن تقييم المعادلة (1 ـ 1) باستعمال الوظيفة اللوغاريتمية المتوفرة في الحواسيب اليدوية . وللفائدة يبين الشكلان (1 ـ 13) و (1 ـ 14) رسماً لمقياس لوغاريتمي ويبين هذان الشكلان المكافىء من الديسيبل لكل من الربح والخسارة في القدرة . فمن أجل ربح في القدرة ($P_2/P_1>1$) اقرأ قيم الديسيبل الموجبة وفي حالة الخسارات ($P_2/P_1<1$) اقرأ قيم الديسيبل السالبة . وفي بعض الأحيان تحذف الإشارة السالبة إذا كان واضحاً بأن الخسارات هي المقصودة . فعلى سبيل المثال ندعو تغيراً في القدرة مقداره (−3 dB) بالخسارة (3 dB) . يبين الشكل (1 ـ 14) مقياساً موسعاً يفيد في حسابات الأرباح والخسارات الصغيرة .



شكل (1 ـ 13) ـ مقياس ديسيبل . يقرأ المقياس الشاقولي إلى اليمين مع المقياس السفلي . ويقرأ المقياس الشاقولي إلى اليسار مع المقياس العلوي . يمكن تذكر هذه القوانين بسهولة عندما ندرك بأن نسب القدرات الأكبر من الواحد تطابق سوية ديسيبل موجب وإن القدرات الأصغر من الواحد تطابق سوية ديسيبل سالب .



شكل (1 ـ 14) ـ مقياس ديسيبل موسع . تطبق نفس القوانين في تفسير هذا المخطط كتلك التي في الشكل (1 ـ 13) .

مثال :

لنفترض ان للعناصر الثلاثة في الشكل (1 ـ 12) خسارات (-11 dB,-6 dB,-3 dB) على التوالي . أوجد الخسارة الكلية للمجموعة . وأوجد الخرج إذا كانت قدرة الدخل 5 mW .

الحل :

نجد بموجب المعادلة (1 ـ 2) ان الخسارة الكلية تساوي المجموع : 3-6-11 - = -20 dB - ومن الشكل (1 ـ 13) نرى أن 20 dB− تكافىء نسبة تساوي 0.01 وتكون القدرة المستقبلة عندئذ :

$$5\,(0{,}01) = 0{,}05 \ \text{mW}$$

مثال :

تبلغ الخسارة لنظام ما 23 dB- . احسب كفاءته .

الحل :

عندما نحل المعادلة (1 ـ 1) من أجل نسبة القدرة نجد :

$$P_2/P_1 = 10^{dB/10} = 10^{-2.3} = 0.005$$

وهكذا تساوي كفاءة إرسال القدرة 0.5 ٪ ويتوجب علينا أيضاً الحصول على نسب سويات القدرة المطابقة إلى 23 dB- بالرجوع إلى الشكل (1 ـ 13) حيث نجد $P_2/P_1 = 0.005$. وإذا لم يتمتع الشكل (1 ـ 13) بالوضوحية الكاملة يمكن أن نستعمل المقياس الموسع المبين في الشكل (1 ـ 14) بالطريقة التالية :

لاحظ بأن : -23 dB = -20 dB - 3 dB . يبين الشكل (1 ـ 14) خسارة مقدارها (0.01) من أجل 20 dB- بينما يعطي الشكل (1 ـ 14) خسارة مقدارها 0.5 من أجل 3 dB- . وتكون الخسارة الكلية التي هي حاصل جداء الخسارتين الجزئيتين مساوية إلى : 0.01 (0.5) = 0.005

وهكذا يستعمل مقياس الديسيبل للدلالة على سويات القدرة النسبية . ويمكن أيضاً أن نستعمل الديسيبل لنعبر عن القدرة المطلقة . فمن أجل هذا نقارن القدرة بقيمة مرجعية ثابتة . ان السوية المرجعية المناسبة هي الميللي وات ويشار إلى قيمة القدرة بالديسيبل نسبة إلى واحد ميللي وات بالمصطلح dBm . نجد من المعادلة (1 ـ 1) بوضع $P_1 = 1$ mW وبكتابة P_2 بالميللي وات مايلي :

$$dBm = 10 \log_{10} P_2$$

يمكن أن يستعمل الشكلان (1 ـ 13) و (1 ـ 14) من أجل حسابات الـ dBm . استبدل فقط قيمة P_2 بالميللي وات بقيمة P_2/P_1 واقرأ عندئذٍ المقياس الشاقولي بالوحدة dBm .

مثال :

يشع ثنائي باعث للضوء 2 mW . احسب قيمة dBm . تنتشر هذه القدرة خلال مجموعة من العناصر ذات خسارة اجمالية مقدارها 23 dB − . احسب قدرة الخرج .

الحل :

من أجل قدرة مشعه (2 mW) ومن الشكل (1 ـ 14) نرى أن نسبة القدرة هذه تطابق 3 dBm . وتنخفض هذه القدرة بسبب الخسارة 23 dB– بمعنى ان قدرة الخرج أقل بمقدار 23 dB من قدرة الدخل . وتساوي قدرة الخرج 3–23=–20 dBm . ومن الشكل (1 ـ 13) نرى بان نسبة القدرة المطابقة تساوي 0.01 (منسوبة الى الميللي وات) وهكذا فان قدرة الخرج هي 0.01 mW .

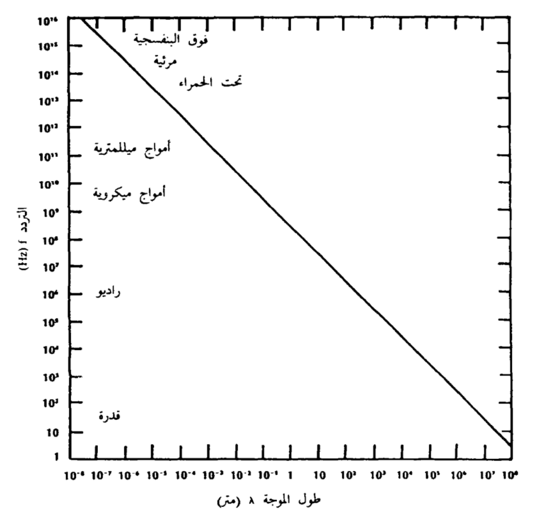
يعتبر الميكروواط سوية مرجعية شائعة أخرى وتكون قيمة القدرة بالديسيبل منسوبة الى الميكروواط كما يلي : $dB\mu = 10 \log_{10} P_2$ حيث تقدر P_2 بالميكروواط . تعرض بعض أجهزة قياس القدرة البصرية قراءاتها مباشرة بوحدات dBm أو $dB\mu$ بينما تشير أجهزة اخرى الى القدرة الضوئية مباشرة بالواط .

(1 ـ 3) ـ طبيعة الضوء The Nature of Light

مع ان الضوء يعم وجود الانسان فان طبيعته الاساسية تبقى على الاقل غامضة جزئياً . اننا نعرف كيف نقدر الظاهرة الضوئية وننشىء تنبؤات مستندة على هذه المعرفة ونعرف كيف نستعمل ونتحكم بالضوء من أجل راحتنا الذاتية . لازال الضوء يفسر غالباً بطرق مختلفة في شرح التجارب والملاحظات المختلفة . يسلك الضوء مسلك الموجة احياناً ومسلك الجسيم احياناً اخرى .

الطبيعة الموجية للضوء The Wave Nature of Light

يمكن تفسير عدة ظواهر ضوئية اذا ادركنا أن الضوء هو موجة كهرمغناطيسية ذات تردد اهتزاز عالٍ جداً وطول موجة قصير جداً . يبين الشكل (1 ـ 15) ترددات الطيف الكهرمغناطيسي ويعطي طول موجة الفراغ الحر وكذلك الاسماء العامة لمدى الترددات المختلفة . نستعمل المصطلح ـ بصري ـ (كما نستعمل المصطلح ـ ضوء ـ) لنشير الى الترددات في الاجزاء تحت الحمراء والمرئية وفوق البنفسجية من الطيف . وذلك لان العديد من تقنيات التحليل والاجهزة تستخدم في مدى هذه الترددات جميعاً .

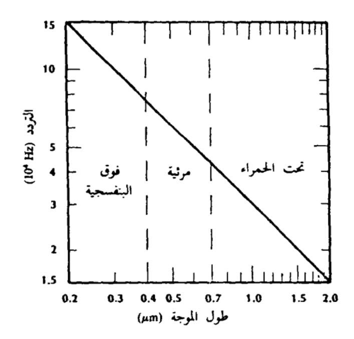


شكل (1 ـ 15) ـ الطيف الكهرمغناطيسي . وتظهر الأسماء المرتبطة بمناطق الترددات المختلفة . يتعلق التردد بطول الموجة حسب العلاقة التالية : $f=c/\lambda$ حيث $c = 3\times10^8$.

ان المدى من الترددات (أو أطوال الموجات) التي تهمنا مبدئيا يبينها الشكل (1 ـ 16) . تمتد اطوال الموجة المرئية من $0.4\ \mu m$ (التي نميزها كلون أزرق) إلى $0.7\ \mu m$ (التي تظهر لنا كلون أحمر) . ان الالياف الزجاجية ليست مرسلات جيدة جداً للضوء في منطقة الرؤية حيث تخمد هذه الألياف الأمواج إلى الحد الذي تكون فيه فقط وصلات الارسال القصيرة عملية . وتكون الخسارة في حال الموجات فوق البنفسجية كذلك أكبر . وفي مدى تحت الحمراء يوجد على أي

حال منطقتان يكون فيهما الزجاج فعالاً جداً . ويحدث هذا عند أطوال موجات قريبة من $0.85\ \mu m$ وفي المنطقة من $1.1\ \mu$ إلى $1.6\ \mu m$.

مع ان الامواج الضوئية ذات ترددات اعلى بكثير من الامواج الراديوية فان كليهما يخضع لنفس القوانين ويشترك بالعديد من الخصائص . ان لجميع الامواج الكهرمغناطيسية حقول كهربائية ومغناطيسية تلازمها وتنتشر جميعها بسرعة عالية .



شكل (1 ـ 16) ـ جزء من الطيف البصري . وتبدو الاسماء المرتبطة بمجالات طول الموجة المحدد . تفصل الخطوط الشاقولية المتقطعة المنطقة المرئية من فوق البنفسجية (UV) ومن تحت الحمراء (IR) .

تنتشر الامواج الكهرمغناطيسية في الفراغ بسرعة $3\times10^8\ m/s$. وتخص هذه السرعة التي يشار اليها بالحرف c انتشار الموجة في الجو . أما في الاوساط الصلبة فتختلف سرعة الموجة وتعتمد قيمتها على المادة وعلى الشكل الهندسي لأي بنية موجهة للموجة قد تكون موجودة . يعطى طول موجة حزمة ضوئية بالعلاقه :

$$\lambda = \frac{v}{f} \qquad (3\text{-}1)$$

حيث v هي سرعة الحزمة و f ترددها . ويحدد التردد بواسطة المنبع الباعث ولا يتغير عندما ينتقل الضوء من مادة الى أخرى . وبموجب المعادلة (1 ـ 3) يسبب اختلاف السرعة تغيراً في طول الموجة . وعندما نشير الى طول موجة محدد نعني ، ما لم يذكر غير ذلك ، قيمته في الفراغ . مثال على ذلك : لنعتبر اشعاعاً بطول موجة (0.8 μm) وباستعمال المعادلة (1 ـ 3) وباعتبار v=c يكون التردد $f=3.75\times10^{14}$ Hz . وهذا في الواقع اهتزاز سريع . يساوي دور هذا الاهتزاز (مقلوب التردد) 2.67×10^{-15} Sec وهو فترة زمنية قصيرة للغاية . يجب ان نلاحظ أيضاً بأن الأطوال الموجية للحزم البصرية هي من فئة الميكرومتر بقرب الطيف المرئي . ان الأطوال الموجية البصرية صغيرة للغاية حتى ان معظم الاجهزة المستعملة في نظام ليفي ذات أبعاد تبلغ عدة أطوال موجية . وليس هذا هو الحال عند الترددات المنخفضة حيث تبلغ أبعاد الأجهزة طول موجة واحدة أو أقل .

تستعمل الطبيعة الموجية للضوء من أجل تحليل كيفية انتشار الحزم البصرية خلال الألياف ، تبين مثل هذه التحاليل الشروط الضرورية من أجل الضوء الذي سيوجه بواسطة الليف . وتبين هذه التحاليل أيضاً السرعة التي تنتشر بها الأمواج . وسندرس خصائص هذه الحالة في فصول لاحقة .

الطبيعة الجسيمية particle للضوء :

كنا قد وصفنا الضوء كموجة إلا أنه أحياناً لا يسلك الضوء مسلك الموجة . وانما يسلك مسلكاً كما لو كان مصنوعاً من جزيئات صغيرة جداً تدعى الفوتونات . وتعطى طاقة الفوتون الواحد بالعلاقة :

$$W = hf \qquad (4\text{-}1)$$

حيث h يساوي 6.626×10^{-34} J×s ويدعى ثابت بلانك . وتقدر الطاقة المحددة في المعادلة (1 ـ 4) بالجول . من غير الممكن أن تقسم الموجة الى أقسام أصغر من الفوتون . وتحتوي عادة حزمة من الضوء على عدد هائل من الفوتونات وهذا ما يوضحه المثال التالي :

مثال :

أوجد عدد الفوتونات الواردة في الثانية على مكشاف اذا كانت القدرة البصرية واحد ميكروواط وطول الموجة $0.8\ \mu m$.

الحل :

من المعادلتين (1 ـ 3) و(1 ـ 4) تكون الطاقة لفوتون مفرد ($0.8\ \mu m$) مايلي :

$$W_p = hf = hc/\lambda = 2.48\times10^{-19}\ J$$

وحيث ان القدرة هي معدل تسليم الطاقة ، يمكن أن نكتب الطاقة الكلية كما يلي :

$$W = Pt$$

وبضرب القدرة ($1\ \mu W$) بالفترة الزمنية (1 Sec.) ينتج طاقة ($1\ \mu J$) . ويكون عدد الفوتونات المطلوب للحصول على ($1\ \mu J$) :

$$\frac{W}{W_p} = \frac{10^{-6}\ J}{2.48\times10^{-19}\ J/photon} = 4.03 \times 10^{12}\ photons$$

في المثال السابق اذا انقصنا زمن ملاحظتنا الى (1 ns) فاننا لانزال نستقبل اكثر من 4000 فوتون . يمكن ان تكتشف المستقبلات الاكثر حساسية وجود اشعاعات ناتجة عن وصول بضعة فوتونات فقط .

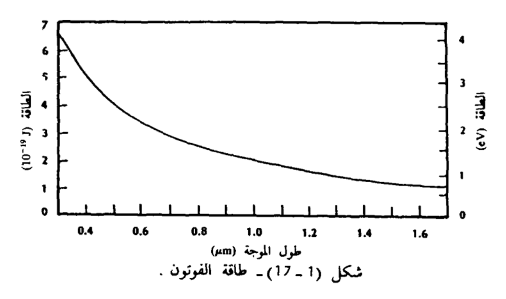
تقاس الطاقة بوحدة مناسبة هي (الكترون فولت) eV وهي الطاقة الحركية التي يكتسبها الكترون واحد عندما يسرّع بواسطة فرق كمون مقداره واحد فولت . وتحدد العلاقة بين الاكترون فولت والجول كما يلي :

$$1\ eV = 1.6 \times 10^{-9}\ J$$

وتعطى طاقة الفوتون ($0.8\ \mu m$) الذي ورد في المثال السابق بالالكترون فولت كما يلي :

$$\frac{2.48 \times 10^{-19}\ J}{1.6 \times 10^{-19}\ J/eV} = 1.55\ eV$$

نرى على الشكل (1 ـ 17) مخططا يبين طاقات الفوتون (بالجول والالكترون فولت) والاطوال الموجية المطابقة لها .



شكل (1 ـ 17) ـ طاقة الفوتون .

توضح نظرية الجسيم توليد الضوء بواسطة المنابع مثل الثنائيات الباعثة للضوء والليزرات والثنائيات الليزرية وتشرح أيضاً كشف الضوء بواسطة تحويل الاشعاع البصري الى تيار كهربائي .

(1 ـ 4) ـ ميزات الالياف

سنناقش الآن ميزات الالياف البصرية وقبل هذا لا بد أن نذكر بعض المحاذير وهي ان الانظمة الليفية ليست كاملة حيث يوجد لها قيود اقتصادية وتقنية . من أجل اي نظام مرغوب يجب تقويم الميزات النسبية للاقنية الموجهة مقابل الاقنية غير الموجهة وللموصلات المعدنية مقابل الالياف . ويمكن ان تفيد المناقشة التالية لخصائص ليف مرغوب في ذلك التقويم .

ان المادة الاساسية للالياف الزجاجية هي ثاني أوكسيد السيليكون المتوفر بكثرة . وتصنع بعض الالياف البصرية من البلاستيك الشفاف وهي مادة أخرى

متوفرة بسهولة فالكلفة هي الاعتبار الاكثر أهمية في النظام ويجب اجراء المقارنات بين الليف والكابلات المعدنية بعناية . يتوفر العديد من الكابلات الليفية وبعضها أرخص من مثيلاتها المعدنية . ويظهر التوفير بوضوح عندما تتم المقارنة على اساس الكلفة لوحدة المعلومات المنقولة . مثلا : ان المقارنة الصحيحة لوصلة هاتفية تكون على اساس الكلفة لكل متر لكل قناة هاتفية وليس لكل متر طولي . يظهر هذا الاعتبار لان للالياف امكانيات اكبر في حمل المعلومات مما للاقنية المعدنية .

يجب ان تتضمن المقارنات الاقتصادية أيضاً نفقات الانشاء والتشغيل والصيانة وان بعض العموميات عن هذه الشؤون تستحق العرض. فمن اجل الخطوط الطويلة تعتبر الكابلات الليفية اقل كلفة للنقل واسهل للتركيب من الكابلات المعدنية وذلك لأن الالياف أصغر وأخف . في تصميم ذي كابل مفرد يبلغ قطر الليف 125 µm ويحتويه غلاف بلاستيكي ذو قطر خارجي 2.5 mm . ويبلغ وزن الكابل (6 kg/km) وتبلغ الخسارة (5 dB/km) . لنقارن هذا الكابل مع الكابل المحوري RG-19/U الذي يبلغ تخميده (22.6 dB/km) عندما يحمل اشارة بتردد (100 MHz) . ويبلغ قطره الخارجي (28.4 mm) ويبلغ وزنه (1110kg/km) . يوجد كابلات محورية أصغر وأخف الا أن الخسارة فيها أعلى من خسارة الكابل RG-19/U . يظهر من هذا المثال المميزات الكبيرة للوزن والحجم للكابلات الليفية . لايوجد اختلافات كبيرة في عمل الانظمة المعدنية أو الليفية فالكلفة هنا قد تكون ذاتها وتختلف على أية حال صيانة الكابلات الليفية. فاذا حدث انقطاع خط ما نتيجة لحادث أو نتيجة لتعديل النظام يجب اعادة التوصيل بشكل دائم او بربط موصلات جديدة . تتطلب هذه العمليات وقتاً ومهارة اكثر من أجل الالياف مما تحتاجه الاسلاك . ونتيجة لذلك يجب الاخذ بعين الاعتبار نفقات الصيانة عند تصميم نظام ما من المحتمل أن تجري عليه عدة تعديلات .

تطورت الالياف والكابلات الليفية لتصبح قوية ومرنة . وبعض الالياف رفيعة بحيث انها لاتنكسر عندما تلف حول قوس بنصف قطر يبلغ فقط بضعة سنتمترات . يتم تخزين الالياف ونقلها ملفوفة باحكام حول مكبات (ملفات)

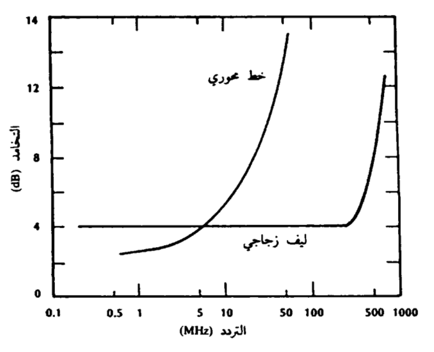
بهذه الانحناءات الصغيرة . ان مرونة الليف صمه جذابة من اجل التركيبات التي تحتوي على عدة لفات على مسار الارسال . ومن أجل انحناءات ذات نصف قطر كبير توجه الالياف الضوء بخسارة مهملة . ويوجد على أي حال بعض الخسارة عند الانحناءات الضيقة جدا . وعندما يحمى الليف مثلاً بتغليفه بغلاف بلاستيكي يصعب عندئذ ثني الكابل الى نصف قطر صغير فلا ينكسر الليف . والالياف التي تحتويها كابلات لاتنكسر بسهولة .

تؤدي اضافة غلاف بلاستيكي الى زيادة قوة الشد لخط ارسال ليفي . ويمكن اضافة قضبان فولاذية داخل الكابل البلاستيكي من أجل زيادة اضافية للقوة اذا احتاج الامر . يوجد مادة دعم أخرى وهي الـ (Kelvar) وهو ليف بوليمر تركيبي ذو قوة شد عالية . بالرغم من الطبيعة الهشة الظاهرية للزجاج تعتبر الكابلات الليفية البصرية قوية البنية ومفيدة .

لقد تطورت التقنيات من أجل انتاج الياف ذات خسارة ارسال منخفضة جدا حيث توجد عدة تصاميم ليفية . ان تخميداً مقداره 4 dB/km يعتبر نموذجيا لاجل الياف زجاجية تجارية عالية الجودة . ويمثل هذا بموجب الشكل (1 ـ 14) كفاءة ارسال مقدارها 40٪ من أجل طول 1 km . لم يمكن الوصول الى هذه الدرجة من الشفافية قبل عام 1970 . ويمكن انشاء وصلات اتصالات طويلة جدا نتيجة جاهزية الالياف ضعيفة الخسارة . ويمكن تحديد مواقع المكررات المطلوبة من اجل تكبير الاشارات الضعيفة على مسافات متباعدة . تزداد خسارة خطوط النقل السلكية بسرعة مع التردد كما يشير اليه الشكل (1 ـ 18) من أجل كابل محوري RG -19/U . فعند الترددات العالية ستنقص بشكل كبير أطوال الوصلات والمسافات بين مراكز التكرار للانظمة السلكية اكثر مما للانظمة الليفية .

ان احد اكثر ميزات الالياف أهمية هي قابليتها في حمل كمية كبيرة من المعلومات بالشكل الرقمي أو التماثلي . مثلا يمكن لليف مفرد من النوع المطور لخدمة هاتفية ان ينقل المعلومات بالمعدل T3 (44.7 Mbps) . وهذا الليف ينقل 672 قناة صوتية وتتوفر الياف بسعات اكبر ايضا . ومع ان انبساط النبضة (انظر

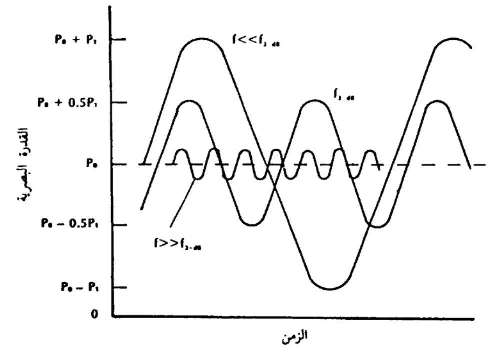
الشكل 1 ـ 8) يحد من المعدل الاعظمي فان امكانيات الليف تؤمن متطلبات معظم انظمة معالجة المعطيات .



شكل (1 ـ 18) ـ التخميد الفعال لطول 1 km من كابل محوري وليف زجاجي . يبلغ عرض نطاق 3 dB لليف 500 MHz .

وفي الصيغة التماثلية يمكن ان ننقل معدلات تعديل خلال الالياف تبلغ مئات الميغاهرتز أو اكثر . وكما هو الحال في الانظمة الرقمية يتحدد هذا المعدل نتيجة تشوه الاشارة البصرية . يظهر على الشكل (1 ـ 18) مخطط تماثلي يبين كيف تتغير الاشارة مع تغير تردد التعديل . نرى على هذا الشكل الخسارة 4 dB عندما تكون ترددات التعديل منخفضة . وعند 500 MHz تزداد الخسارة بمقدار 3 dB . نقول بأن لهذا الطول من الليف عرض نطاق 500 MHz عند 3 dB ونرمز له بالرمز (f_{3-dB}). وفوق هذا التردد يزداد تخامد التعديل . يتطلب تخميد التردد العالي بعض الايضاح فهو ليس نتيجة لأي خسارة اضافية في القدرة مثل الامتصاص في الليف . في الحقيقة تبقى كفاءة ارسال الليف عند (4 dB) بغض النظر عن معدل التعديل . يوضح الشكل (1 ـ 19) المشكلة التي تظهر عند معدلات التعديل العالية . يحتوي التغير الزمني للقدرة البصرية المعلومات التي

يتم ارسالها . وحينما يزداد تردد التعديل يسبب تشوه الاشارة خسارة في اتساع هذا التغير . ويحدث هذا نتيجة انبساط مناطق الذروة في القدرة نحو المناطق الادنى المجاورة . وتكون النتيجة انخفاض القدرة عند الذروة وارتفاع القدرة عند القيمة الدنيا للموجة . تكون هذه النتيجة مهملة عند الترددات المنخفضة ذلك لأن الانبساط يكون أصغر بالمقارنة مع الفاصل بين الذروات والاصفار المجاورة . وعند الترددات العالية يصبح الانبساط مهماً بالمقارنة مع هذا التباعد . وهكذا ينقص بشكل كبير التغير في القدرة . لاتزال القدرة البصرية ترسل بفعالية (عند خسارة 4 dB في هذا المثال) الا ان المعلومات تكون قد فقدت . تفسر بسهولة اكثر الخسارات المبينة في الشكل (1 ـ 18) من أجل كابل محوري . فهي تمثل الكفاءات الفعلية لارسال القدرة . ويظهر بوضوح التفوق النسبي لليف الزجاجي عند معدل معلومات أعلى .



شكل (1 ـ 19) ـ القدرة البصرية عند خرج كابل ليفي من أجل ترددات تعديل مختلفة . ان عرض النطاق (3 dB) هو $f_{3\text{-}dB}$. وتكون القدرة المتوسطة P_0 في جميع الحالات . عند $f_{3\text{-}dB}$ يساوي تغير الذروة في القدرة البصرية نصف ما هو عليه عند ترددات التعديل المنخفضة .

يمكن إجراء مقارنة مثيرة بين كابل هاتفي معدني معير ، وكابل ليفي . يحتوي الكابل المعدني 900 زوج من الأسلاك المجدولة ويبلغ قطره 70 mm . ويحمل كل زوج 24 قناة صوتية (المعدل T1) وهكذا تبلغ سعة الكابل 21600 مكالمة . ومن أجل كابل ليفي صنع من أجل تطبيقات هاتفية يبلغ قطره 12.7 mm ويحتوي 144 ليفاً يعمل كل منها عند المعدل T3 (672 قناة) . يتمتع هذا الكابل بسعة إجمالية مقدارها 96768 مكالمة . إن للكابل الليفي تقريباً سعة أكبر بمقدار 4.5 مرة مما للكابل السلكي وله مساحة مقطع أصغر بمقدار 30 مرة .

إن الألياف البصرية سواء الزجاجية منها أم البلاستيكية هي عوازن لا يتدفق خلالها تيارات كهربائية سواء أكانت ناتجة عن الإشارة المرسلة أو عن الإشعاعات الخارجية التي تصطدم بالليف . وبالاضافة لذلك فإن الموجة البصرية داخل الليف تكون محجوزة ولا يحدث لذلك أي تسرب خلال الإرسال يمكن أن يتداخل مع إشارات في ألياف أخرى . وعلى العكس لا يمكن للضوء أن يدخل الليف من جانبه . نستنتج من هذا أن الليف محمي تماماً من التداخل والاقتران مع أقنية اتصالات أخرى سواء أكانت كهربائية أم بصرية .

للأسباب المذكورة أعلاه تتمتع الألياف بنبذ ممتاز لتداخل التردد الراديوي (RFI) وللتداخل الكهرمغناطيسي (EMI) . يشير RFI إلى التداخل الحاصل من محطات التلفزيون والراديو والإشارات الرادارية أو إشارات أخرى تنشأ في التجهيزات الإلكترونية . ويتضمن EMI تلك المنابع من الإشعاع وتلك التي تسببها الظواهر الطبيعية كالبرق أو التي تتسبب عن غير قصد كالشرارة . ستؤدي هذه الإشارات غير المرغوبة ، إذا لم تطرح ، إلى زيادة سوية ضجيج النظام ليتجاوز الحدود المسموحة . يظهر تفوق الليف في طرحه خارجياً الضجيج الخلفي المحدث . إن قدرة الليف في عزل نفسه عن محيطه يسمح لنا بحزم عدة ألياف مع بعضها في كابل من أجل عدة أقنية من المعلومات على طول خط مفرد فلا يحدث تداخل .

بسبب كون الألياف عوازل فإنها لن تلتقط أو تنقل النبضات الكهرمغناطيسية (EMP) التي تسببها الإنفجارات الذرية التي يمكن أن تحرض

ملايين الفولتات في خط إرسال ناقل . يمكن لنبضة الجهد أن تنتقل عدة أميال على طول السلك وتحطم في نهاية الأمر (بسبب قوتها) الالكترونيات عند نهاية المسار .

تتميز الطبيعة العازلة لليف بعدة نتائج عملية أخرى . ففي محيط حيث توجد خطوط جهد عالي قد تؤدي وصلة اتصالات سلكية إلى إحداث دارة قصر على الخطوط نتيجة سقوطها عليها مؤدياً هذا إلى حدوث عطل كبير . وقد يؤدي حدوث الشرارة في هذه الطريقة إلى إشتعال غازات الاحتراق في المنطقة . إن هذه المشكلة تختفي بوجود الألياف . وهناك ميزة أخرى وهي أن الإقتران البصري يلغي الحاجة لخط أرض مشترك بين المرسل الليفي والمستقبل فلا تتشكل الوصلات الأرضية المزعجة . وإضافة لما ورد يمكن إصلاح الليف أثناء تشغيل النظام من غير إمكانية حدوث قصر للالكترونيات عند المرسل أو المستقبل . قد يمكن لهذه المشكلة أن تحدث عند إصلاح كابل معدني .

توفر الألياف درجة من السرية والخصوصية . حيث أن الألياف لا تشع الطاقة ضمنها فمن الصعب على متطفل كشف الإشارة المرسَلة . وحتى يمكن الحصول على الإشارة يجب أن يجري اقتحام مادي على الكابل . إن كسر الليف أو دمج ليف جديد في الليف المرسل يؤدي إلى الحصول على منفذ إلى الحزمة البصرية . ومن جراء مثل هذا التعديل على الوصلة ستنقص القدرة الواصلة إلى المستقبل . يمكن لمستقبل حساس أن يقيس هذه الخسارة بافتراض أخذ العلم عن أن تطفلاً قد حدث . ومن أجل تحسين فرصة الكشف يجب أن يراقب النظام بشكل دائم .

تتضمن أنظمة الإتصالات الالكترونية معالجة المعلومات قبل تسليمها إلى قناة المعلومات وبعد وصولها إلى الطرف المستقبل . وتتطلب الأنظمة الليفية معالجة مماثلة إلى حد كبير . يسمح هذا بدمج الألياف في أنظمة مخصصة أصلاً للإرسال باستخدام الكابلات بعد إجراء تعديلات طفيفة فقط . وكمثال جيد على ذلك هو توافق الليف مع البناء الأساسي لنظام هاتفي . حتى أنه من الممكن أن نصنع نظاماً بصرياً شفافاً للمستثمر . ويعني هذا بأن المستثمر لا يحتاج أن يدرك بأن الإشارة الكهربائية قد تحولت إلى شكل بصري وأرسلت كحزمة

ضوئية وتحولت عندئذ إلى شكل كهربائي . فالمستثمر يقدم ببساطة إشارات دخل كهربائية ويستقبل إشارات خرج كهربائية كما يفعل دائماً من أجل جميع الأنظمة الالكترونية . ويعني أيضاً التوافق مع الأنظمة الالكترونية بأنه يمكن للأشخاص المدربين على الأنظمة الالكترونية أن ينقلوا مهاراتهم بكل سهولة إلى الأنظمة الليفية .

إن التآكل نتيجة الماء أو المواد الكيميائية أقل قسوة على الزجاج مما هو بالنسبة للنحاس الذي يحل محله . وعلى أي حال يجب ألا يتخلل الماء الزجاج . من أجل التطبيقات المغمورة في الماء تغلف الألياف ضمن كابلات تحميها من الماء . يمكن أن تتحمل الألياف الزجاجية ذاتها درجات حرارة عالية قبل أن تتلف . فلا يتأثر الليف الزجاجي حتى درجات حرارة تقارب (800°C) . بينما تكون العناصر الأخرى في النظام الليفي أكثر حساسية لارتفاع في درجة الحرارة حيث يمكن أن ينصهر غلاف الكابل البلاستيكي تاركاً الليف من غير حماية ومن المحتمل أن يتشوه الليف وسيزيد هذا التشوه الخسارة فيه . يتوفر تجارياً بتكاليف متواضعة كابلات ليفية تعمل بين (−25°C) و (+65°C) . تؤدي التغيرات الكبيرة في درجات الحرارة إلى تمددات وتقلصات في الكابل مما يفسد التراصف الدقيق (إحكام محوري الليفين عند الوصلة على استقامة واحدة) المطلوب من أجل التوصيلات ضعيفة الخسارة .

تتوفر الألياف بأطوال كبيرة مما يقلل الحاجة إلى وصلات دائمة متعددة . إن طولاً مقداره 1 km يعتبر طولاً شائعاً وقد أمكن إنتاج جدائل متواصلة بأطوال تبلغ عدة كيلومترات .

من أجل أن نكون منطقيين يجب أن نذكر شيئاً ما عن إحدى سيئات الألياف البصرية . إن كلفة الموصل البصري مرتفعة وخسارته أيضاً كبيرة ويتطلب تركيبه الكثير من الوقت . أما أسباب هذه الحال فهي مفهومة جداً . من أجل توصيل جيد يجب إحكام الليفين على استقامة واحدة بدقة تامة . ترتفع كلفة الموصلات المعدنية ذات الدقة الضرورية من أجل خسارة أقل قليلاً من 1 dB عندما يتكرر إقتران وإنفصال الألياف . يرغب المصممون الحصول على موصلات جاهزة حتى بخسارة أقل من (0.1 dB) مثلاً وهذا صعب التحقيق مع

أن التقنيات متوفرة من أجل تحقيق إقتران بشكل دائم بهذه الخسارة . تتوفر موصلات بلاستيكية غير مكلفة بخسارات نموذجية تبلغ 2 dB أو أكثر وتكفي هذه من أجل بعض التطبيقات .

(1 ـ 5) تطبيقات الاتصالات بالألياف البصرية

في بضع السنوات الأولى التالية لاكتشاف الليزر كان تطور التطبيقات بطيئاً لدرجة أن الليزر قد وصف بأنه حل يبحث عن مشكلة يطلب حلها . لم تسمع أي تعليقات فيها يتعلق بظهور بصريات الألياف كتكنولوجيا عملية . وقد تم دخول الألياف في الأنظمة العملياتية بسرعة كبيرة بالمقارنة مع الزمن الذي تتطلبه عادة الابتكارات الهندسية المقبولة . ظهرت التطبيقات الأولى الأوسع مجالاً في الوصلات الهاتفية . إن الضغوط في توسيع الخدمة وملاءمة الألياف للإتصالات الصوتية أسهمت في تعجيل تصميم وإختبار التجهيزات الهاتفية العملياتية . وقد أظهرت الخبرة الهاتفية الناحية العملية والموثوقية للإتصالات الليفية . وقد قدمت طرق تصميم أنظمة وتجهيزات يمكن أن تستعمل في تطبيقات أخرى .

يوصف هذا الفصل بضع تطبيقات للألياف . انها ليست شاملة بل هي مؤشر للمجالات حيث تكون الألياف البصرية ناجحة . وأنّ الخصائص المذكورة ليست الحدود النهائية لأداء الليف إلا أنها بعض من المنجزات النموذجية . علاوة على ذلك لقد تركت عدة تفاصيل في بناء النظام وأدائه إلى فصول لاحقة . ستفهم هذه التفاصيل بشكل أفضل بعد أن تستوعب المادة الأساس في الفصول اللاحقة .

إن الحجم الصغير والسعة الكبيرة لحمل المعلومات بالألياف البصرية يجعلها جذابة كبدائل للكابلات النحاسية التقليدية ذات الأزواج الأسلاك المجدولة في الأنظمة الهاتفية . في واحد من أوائل الأنظمة المركبة كانت خطوط ربط رئيسية ليفية قد وصلت بين مكاتب الهاتف في Chicago . كانت المكاتب

تبعد عن بعضها مسافة 1 km و 2.4 km . ان العمل بالمعدل T3 قد أتاح لكل واحد من الأربع والعشرين ليفاً في الكابل ان يحمل 672 رسالة صوتية .

لقد تأكدت فاعلية خطوط ربط متواصلة (بدون محطات تكرار) بطول أكثر من (100 km) وقد سمح هذا بإنشاء خطوط اتصالات رئيسية بين المدن . تزيد المكررات أطوال المسارات المسموحة بواسطة تعزيز الإشارات الضعيفة واستعادة أشكالها . ويمكن بفضل المكررات أن نرسل رسائل بألياف يبلغ طولها عدة آلاف كيلومتر . وبسبب تخامد الألياف الضعيف يمكن أن تكون الفواصل بين المكررات في نظام ليفي أكبر مما هو عليه في نظام بكابلات محورية . يبلغ التوفير في نفقات الإنشاء والصيانة مقداراً كبيراً عندما تكون المسافات بين المكررات كبيرة . تمكّن المسافات الطويلة بين المكررات من تصميم وصلات تحت الماء تجتاز المحيط الأطلسي . تبلغ المسافة بين نيويورك ولندن (6500 km) وتتطلب حوالي 200 مكرراً تفصلها عن بعضها مسافات من 30 km إلى 35 km . وبسبب نفقات الإنشاء الكبيرة يجب لنظام غاطس اقتصادي أن يحمل كمية ضخمة من المعلومات . ويمكن استعمال المعدل T4 (274 Mbps) حيث يرسل كل ليف 4000 مكالمة . إن الوزن الخفيف للكابلات الليفية بالمقارنة مع الكابلات المحورية يعطيها مميزات واضحة من أجل التطبيقات ذات الكابل الغاطس بسبب السهولة النسبية في نقل وتركيب الكابلات الليفية .

تشير عبارة المدينة المسلّكة إلى تجمع سكاني يكون لكل منزل فيه نفاذ إلكتروني إلى عدد كبير من الخدمات المعلوماتية . وعندما تكون التوصيلات بصرية يصبح المصطلح المدينة المليّفة أكثر دقة . تم تأسيس مثل هذا التجمع في اليابان وفق البرنامج الاختباري Hi – OVIS .

(Higashi – Ikoma Optical Visual Information System)

وكذلك تعني Hi – OVIS ما يلي :

(Highly Interactive Optical Visual Information System)

يتألف النظام من مركز عام ومركز فرعي ومطاريف منزلية متصلة بواسطة خطوط إرسال بصرية . وتوصل الخطوط تجهيزات الفيديو والحواسيب . لكل مطراف منزلي جهاز تلفزيون وآلة تصوير وميكرفون ولوحة أزرار . ويتم الحصول على

إتصالات تفاعلية بالاتجاهين . وصلت المطاريف مبدئياً إلى 158 منزل خاص . تشمل خدمات المشتركين الاستقبال المباشر لبرامج تلفزيونية فتعطي صوراً وصوتاً بجودة أفضل بالمقارنة مع الاستقبال التلفزيوني التقليدي ذي الهوائي . تذاع برامج تلفزيونية ذات طبيعة محلية . مثلاً : برامج تشمل إدارات الأطفاء والشرطة المحلية ومعلومات التسويق المحلية . وتتوفر خدمة طلبات فيديو حيث يمكن لمشترك أن يطلب تشغيل حافظة فيديوية خاصة من موقع تخزين مركزي . وتتوفر مقررات دراسة منزلية وكذلك صور تعطي معلومات عن التسهيلات الطبية وجداول التوقيت للقطارات وما شابه . تتطلب مثل تلك الخدمات الموصوفة عرض نطاقات كبيرة تتوفر فقط باستعمال أنظمة إرسال عريضة النطاق وهذا ما تقدمه الاتصالات بالألياف البصرية . برز نظام Hi - OVIS في مجالين : الإقلال من ممارسة عدة أنواع من الإتصالات الليفية الصوتية والفيديوية وكذلك تطوير خدمات منتشرة بشكل كبير يمكن الحصول عليها من البيت . وقد وسعت تجمعات سكانية أخرى في أرجاء العالم مجال وأغراض المدينة الملّيفة .

تعاني وصلات الإتصالات المعدنية المقامة على طول خطوط السكك الحديدية المكهربة من التداخل الكهرمغناطيسي من الكهرباء المغذية للعربات . وبسبب طرح الليف للتداخل الكهرمغناطيسي (EMI) فلا تتدنى جودة الإشارات المنقولة خلال الألياف المتوضعة على طول خطوط السكك . إن الإتصالات البصرية تتوافق مع خطوط السكك المكهربة بينما ليست كذلك الأنظمة السلكية . بالمثل يمكن وضع الألياف قرب خطوط القدرة ذات الجهد العالي بدون آثار معاكسة بينما ستكون الأنظمة السلكية ذات ضجيج . حتى أن الألياف يمكن أن تمر خلال مناطق توليد القدرة الكهربائية أو خلال محطاتها الفرعية من غير أن تتأثر . يمكن أن تعلق الكابلات البصرية مباشرة بأبراج خطوط القدرة أو الأعمدة إذا كانت الفراغات أو الأحمال تسمح بذلك . يوجد حل بديل وهو أن يحتوي أحد الكابلات الليف مع الناقل المعدني بمعنى أن نضمّن الليف في كابل سلكي . يوضع غالباً ناقل أرضي للحماية من الصواعق

فوق مجموعة خطوط نقل القدرة ذات الجهد العالي وهذا مكان مناسب من أجل احتواء الليف .

إن التطبيقات التي هي في الأصل فيديوية تشمل البث التلفزيوني والكابل التلفزيوني (CATV) والمراقبة والإشراف عن بعد . تستعمل صناعة البث التلفزيوني الإرسال الليفي في الوصلات القصيرة . مثلاً : من الستوديو إلى المرسل أو من موقع حدث حي إلى عربة التجهيزات أو من موقع حدث حي مباشرة إلى الستوديو . في حالة تغطية الأحداث الحية يسمح الوزن الخفيف للكابلات الليفية بمدى مهم من الحركة من أجل كاميرات التلفزيون النظامية أو من أجل الكاميرات الصغيرة التلفزيونية . يطلب في هذه التطبيقات الإذاعية قصيرة المدى قناة واحدة فقط وهكذا يتم تعديل الإشارات بالشكل التماثلي وإرسالها في النطاق الأساسي ويكفي من أجل ذلك عرض نطاق مقداره 6 MHz . ومن أجل مسار أطول حيث قد تستعمل مكررات أو حيث ستحول الإشارات إلى خطوط الهاتف التجارية يفضل استعمال تعديل رقمي .

إن أنظمة التلفزيون ذات الكابلات تجمع وتوزع عدداً ضخماً من الأقنية الملونة . وتغطي مسافات تتراوح بين بضع عشرات من الأمتار وحتى عدة كيلومترات . تحصل أنظمة CATV على إشاراتها من مصادر مختلفة . وتشمل هذه المصادر على محطات (أرضية/سواتل) ووصلات ميكروية وهوائيات تلتقط البث من مرسلات مجاورة واستوديوهات محلية . يمكن وصل جميع هذه المصادر بواسطة ألياف إلى موقع التوزيع المركزي . من الشائع من أجل CATV استعمال صور فيديو بتعديل ترددي (FM) يشغل عرض نطاق بحدود 20 MHz . يحسن الـ FM نسبة الإشارة إلى الضجيج وينتج أنظمة ذاتٌ تسامح تشويشي أفضل . وهكذا يقبل التزايد في عرض النطاق (من 6 MHz إلى 20 MHz) . يتم التوفيق بين عدة أقنية بواسطة وضع ليف منفصل في الكابل من أجل كل قناة أو بتجميع التقسيم الترددي (FDM) . في الـ FDM تعدّل كل قناة على حامل تردد راديوي مختلف قبل تطبيقها على المنبع البصري . بهذه الطريقة يتم إرسال عدة أقنية في آن على طول ليف مفرد . وفي نظام (FM) بأربعة أقنية يمكن تحديد موقع الحامل عند 30 , 50 , 70 , 90 MHz . وعند المستقبل يتم فصل الأقنية الأربعة بواسطة

مراشيح ويتم كشفها عندئذ من أجل استعادة إشارات النطاق الأساسي . ويمكن زيادة سعة خطوط التوصيل إلى مدى أكبر إذا وضع في الكابل عدة ألياف يحمل كل واحد منها أقنية متعددة . تفيد الألياف في جميع أجزاء نظم توزيع الـ CATV . لقد وصفنا فقط الإرسال الليفي من المصدر إلى موقع التوزيع المركزي لنظام CATV . يمكن استخدام الألياف خلال شبكات توزيع الفيديو ويشمل هذا الوصلة النهائية حتى منزل المشترك .

يتنافس إرسال الفيديو بالألياف البصرية بنجاح مع الكابل المحوري في أنظمة الإشراف والمراقبة عن بعد . تظهر في هذه التطبيقات أهمية طرح الـ EMI والحساسية الضعيفة لضرر الصواعق . وكأمثلة محددة : مراقبة محطات توليد القدرة ونقاط التحكم الحرجة على طول سكة حديدية وساحات وقوف السيارات والحدود الخارجية لمنشآت عسكرية . يمكن القراءة عن بعد لأرقام التعرف لعربات السكك الحديدية . وتكون عادة الصور البيضاء والسوداء مقبولة لمثل هذه التطبيقات . تبلغ أطوال الإرسال أقل من 5 km مع أن السكك الحديدية يمكن أن تتطلب خطوطاً حتى 20 km . وحيث أن كل كاميرا ترسل على قناة واحدة يقبل التعديل التماثلي ذو النطاق الأساسي وهذا يعني أن إشارة النطاق الأساسي تعدل مباشرة شدة منبع الحامل البصري . يمكن لأنظمة أطول وأكثر تعقيداً أن تستعمل FM من أجل جودة إشارة أفضل و FDM من أجل أقنية متعددة . ويكفي غالباً الإرسال باتجاه واحد (أو مفرد الإرسال) وفي حال النفي يمكن لليف ثاني أن يعيد الرسائل إلى موقع الكاميرا . أما الإرسال بالاتجاهين حيث يمكن للإشارات أن تنتشر في كلا الاتجاهين في آن على طول ليف مفرد هو أمر يمكن تحقيقه إلا أن التجهيزات تصبح أكثر تعقيداً .

تناسب على وجه الخصوص الأنظمة الليفية من أجل إرسال معطيات رقمية كالتي تولدها الحواسيب حيث يمكن أن يستخدم الليف في تنفيذ التوصيلات الداخلية بين وحدة المعالجة المركزية (CPU) والتجهيزات الطرفية (مطاريف) وبين الـ CPU والذاكرة وبين وحدات المعالجة المركزية نفسها . كمثال جيد على ذلك هو توصيل عدة مئات من مطاريف أنابيب أشعة مهبطية (CRT) موزعة على الطوابق مع المعالج الموضوع في أحد الطوابق . إن الوزن

الخفيف والحجم الصغير والسلامة الناتجة من خط إرسال غير مشع يجعل الألياف جذابة من أجل نقل المعلومات خلال أي مسافة .

عندما تقع التجهيزات المتصلة جميعها ضمن غرفة واحدة تكون مسافات الإرسال صغيرة حيث يمكن تحقيق معدل خطأ جيد جداً (10^{-12} أو أفضل) . ويمكن بسهولة تحقيق معدلات من فئة 200 Mbps لهذه التطبيقات بين الغرف . إن الإنشاءات بين المواقع هي التوصيلات بين التجهيزات الموضوعة في الغرف المختلفة أو الأبنية المختلفة أو حتى في المدن المختلفة . وتقوم شبكة المنطقة المحلية (LAN) بتوزيع المعلومات إلى عدة محطات ضمن منطقة محدودة (مثلاً : تقع جميع المحطات ضمن بناء واحد) . تتوفر أشكال متنوعة من دراسات طبوغرافية شبكية من أجل شبكات المنطقة المحلية التي تستعمل الإرسال الليفي .

إن الإرسال بالألياف البصرية لمعطيات التحكم مفيد في المناطق حيث توجد الجهود العالية . ويوجد مثل هذا المحيط عند إجراء تجارب الصهر المستحث بالليزر . إن المعالجات الصغرية التي تتحكم بتتابع الإطلاق الليزري وبالمكبرات الليزرية توصل بواسطة الألياف من أجل حذف التداخل الذي تحققه الجهود الكبيرة على النواقل المعدنية .

تكثر التطبيقات العسكرية بالألياف البصرية وتتضمن وصلات الإتصالات والتحكم والقيادة على السفن والطائرات ووصلات المعطيات من أجل المحطات (أرض/سواتل) وخطوط الإرسال واتصالات مراكز القيادة التكتيكية . إن خواص الليف المهمة هي الوزن الخفيف والحجم الصغير وطرح الـ EMI وعدم إشعاع الإشارة . وعلى الطائرات والسفن تظهر الفوائد المهمة لتناقص مصادفات حدوث الصدمات والنار والشرارة . وكذلك تبرهن المقاومة العالية للتآكل استعمال الألياف في البحر سواء على ظهر السفينة أو داخل المحيط . ومن أجل التطبيقات الحقلية تسرّع الألياف خفيفة الوزن تمديد الكابلات .

تتراوح الإتصالات التكتيكية بدءاً من وصلات قصيرة المدى (التي توصل الملاجىء الحقلية) وحتى وصلات المسافات الطويلة (خطوط بطول 60 km) .

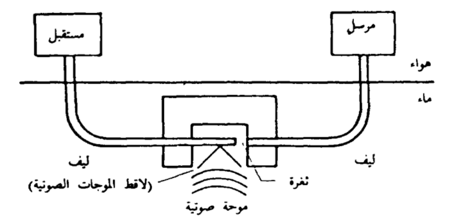
يوجد تطبيق حديث وهو الصاروخ ذو التوجيه الليفي . يجري فيه إرخاء الليف أثناء طيران الصاروخ . ترسل المحاسيس التي هي على الصاروخ معلومات فيديو خلال الليف إلى عربة تحكم أرضية . وتحول ثانية الأوامر من العربة إلى الصاروخ عبر الليف .

إن محاسيس الليف ، مع أنها ليست تماماً شبكات اتصالات ، لا تزال تمثل تطبيقاً مهما لليف البصري . استعملت المحاسيس الليفية في قياس درجة الحرارة والضغط والوضع الدوراني والخطي وسويات السائل . تملك الألياف في بعض هذه الأجهزة غرضاً مزدوجاً . فالمحساس ذاته يعتمد على بعض خواص الليف وأما المعلومات المجمعة فإنها ترسل خلال الليف إلى موقع الاظهار . سنصف باختصار اثنين من تطبيقات المحساس : الجيروسكوب الليفي والهيدروفون الليفي .

تقيس الجيروسكوبات الحركات الدورانية . وحتى ظهور الجيروسكوبات البصرية الليزرية الحلقية كانت جميع الأجهزة العملية جيروسكوبات ميكانيكية دوارة . وتتميز الجيروسكوبات البصرية بعدم وجود أجزاء متحركة . تعاني الحلقة الليزرية من ظاهرة الانحباس عند معدلات دوران منخفضة . وهكذا لا يمكن كشف المعدلات البطيئة من غير تعقيد النظام . إن الجيروسكوب الليفي لا يعاني من مشكلة الانحباس . يتألف المحساس الأساسي من ملف ليفي طويل بإشارة بصرية (من منبع مفرد) تمر خلاله في كلا الاتجاهين . يقاس فرق الطور للحزم المنتشرة المتعاكسة . فإذا كان الملف ثابتاً يكون هذا الفرق صفراً . وإذا كان الملف يدور يكون فرق الطور مقياساً لمعدل الدوران .

تستعمل الهيدروفونات في قياس الاضطرابات الصوتية في الماء . يبين الشكل (1 ـ 20) تصميماً بسيطاً بفكرته . ليس الليف متواصلاً إنما يوجد فيه انقطاع . وعند الإنقطاع يثبت أحد الليفين بينما يوصل الثاني إلى غشاء اللاقط . تهز الموجة الصوتية الغشاء وتزيح الليف القابل للحركة فتتغير بالتالي كفاءة الاقتران وفق مطال وتردد الازاحة . وتكون حينئذ القدرة المسلّمة إلى المستقبل مقياساً لتردد ومطال الموجة الصوتية . يعمل الليف في هذا النظام كمحساس

وكقناة إرسال للمعلومات . وقد تم اختبار أنواع عديدة أخرى من تصاميم الهيدروفون .



شكل (1 ـ 20) ـ هيدروفون ليفي . يتعرض الليف اليساري لإزاحة عندما تظهر موجة صوتية فتتغير كمية الضوء المنقول عبر الثغرة . ويجري قياس التغير في شدة الضوء بواسطة المستقبل .

يعرض الجدول (1 ـ 6) قائمة بالتطبيقات الليفية التي تم وصفها . وقد اتبعنا تقسيمات بحسب الأنواع الأربعة وهي الصوت والفيديو والمعطيات والمحاسيس مع أنه في بعض الحالات ينتمي النظام إلى أكثر من واحدة من هذه الأصناف . إن المدينة المليّفة مثال يبين فيه أن الألياف تحمل الصوت والصورة (وربما معطيات) وبرغم ذلك فإن معظم الأنظمة تتفق مع أحد هذه المجالات الرئيسية . سيعمل واضعوا تصاميم الأنظمة على مراجعة التصاميم الأخرى في نفس الفئات الرئيسية . وفي أثناء إكمال تصميماتهم الخاصة سيطبق المصممون خططاً قد يثبت نجاحها .

جدول (1 ـ 6) ـ تطبيقات الليف

الصوت

وصلات هاتفية رئيسية

بين المراكز

بين المدن

عبر المحيط

خدمة المشترك

مدينة مليّفة

خدمة النطاق العريض

قرب محطات توليد القدرة الكهربائية

على طول خطوط القدرة

على طول السكك الحديدية المكهربة

الاتصالات الميدانية

الصورة

بث تلفزيوني

احداث حية

كاميرات تلفزيونية صغرية

CATV

وصلات رئيسية من المنبع الى الخط

توزيع

نقط تفرع المشترك

الاشراف

المراقبة عن بعد

الصواريخ الموجهة بالليف

المدينة المليّفة

المعطيات

حواسيب

من CPU الى المطاريف

من CPU الى CPU

وصلات معطيات بين المكاتب

شبكات المنطقة المحلية LAN

التوصيلات ضمن الطائرات

التوصيلات ضمن السفن

محطات ارض / سواتل

المحاسيس

الجيروسكوب

الهيدروفون

الموقع

درجة الحرارة

(1 ـ 6) ـ الخلاصة

حصل القارىء الجاد الآن الى حد ما على معرفة عامة عن انظمة الاتصالات بالألياف البصرية . ما هي وماذا تعمل والميزات التي يمكن ان تتمتع بها بالنسبة للبدائل السلكية . تشمل هذه المعرفة التصور التفصيلي لوصلة من نقطة الى نقطة والاجهزة الرئيسية فيها . يتضمن باقي هذا الكتاب الدراسة التفصيلية لهذه الاجهزة (تصميمها ومميزات التشغيل لها) وكيف تتوافق فيما بينها من اجل ان تقابل مواصفات الاداء المرغوبة . لم نحصل بعد على الادوات من أجل اختبار عناصر وبناء النظام الا أن القارىء في وضع الآن يمكنه من تقدير مجموعة القرارات التي يواجهها مصمموا النظام . فيما يلي بعض هذه القرارات :

1 ـ كابل معدني أو ليفي
2 ـ شكل الارسال ـ مفرد ، نصف مزدوج أو مزدوج
3 ـ نوع التعديل
4 ـ استراتيجية (خطة) تعدد الارسال
5 ـ طول موجة التشغيل
6 ـ اختيار المنبع الضوئي
7 ـ مواصفات الليف
8 ـ مواصفات الكابل
9 ـ اختيار تقنيات الموصلات والوصل الدائم
10 ـ اختيار المكاشيف

سنناقش بايجاز كلا من هذه المواضيع في الفقرات التالية . كنا قد عرضنا ميزات الالياف في هذا الفصل . ربما لاتزال الكابلات المعدنية مفضلة من اجل اي نظام معين فالخطوط الناقلة متوفرة بسهولة من الموزعين في معظم المدن الرئيسية ووصلها أسهل وكذلك موصلاتها سهلة التركيب . والتفريع منها سهل نسبيا وغير مكلف ويجب تقويم نفقات الكابلات المعدنية والليفية من أجل التطبيق المرغوب . يتخذ في بعض الاحيان القرار باستعمال وصلات معدنية أو ليفية قبل أن يعهد لمصممي النظام بالعمل . وبالمثل يمكن الا يتمتع مصمم النظام بيد طليقة فيما يخص الخيارات الاخرى في القائمة . فمثلا : التوافق مع الانظمة القائمة قد يفرض ليفا أو طول موجة أو منبعاً خاصاً .

ان الاتصالات من نقطة الى نقطة في اتجاه واحد فقط هي وصلة مفردة وان الاتصالات ذات الاتجاهين يمكن تحقيقها بالارسال على طول ليف واحد بالاتجاهين (مزدوج كامل) . يوجد حل أبسط (الا انه قد يكون اكثر كلفة) يستعمل ليفين داخل كابل . واحد من أجل كل اتجاه لمسير المعلومات ويسمى هذا الحل (نصف مزدوج) . يمكن ان تلائم تصاميم الليف الارسال بحسب النوع المفرد أو نصف المزدوج أو المزدوج الكامل .

يجب اتخاذ قرار تصميم النظام في وقت مبكر من أجل اختيار صيغة التعديل (تعديل تماثلي أو رقمي) فعندما تكون المعلومات بالشكل الرقمي يكون

الارسال الرقمي هو الخيار الاكثر احتمالاً . وعندما تولد المعلومات بالشكل التماثلي (رسائل الصوت الهاتفية أو الصور من كاميرا فيديو مثلاً) قد يكون القرار صعباً . من أجل أقنية اشارة مفردة لمسافات قصيرة تصل اشارات نطاق الاساس التماثلية الى المستقبل بالشكل والشدة المناسبين . وسيكون تشوه الاشارة الناتج عن الارسال مهملاً . وهكذا سوف لن تكون الكلفة والتعقيد للتحويل من تماثلي الى رقمي مبررين . ومن اجل المسافات الطويلة وخصوصاً اذا كانت المكررات ضرورية قد يكون التحويل الى رقمي امراً مرغوباً فالمكررات الرقمية أبسط من المكررات التماثلية وينتج الارسال الرقمي اشارات مستقبلة ذات جودة أفضل . أما سيئة الشكل الرقمي هو عرض النطاق المتزايد المطلوب من أجل الارسال .

يجب اختيار نظام للتجميع اذا تطلب الامر ارسال اكثر من قناة . توجد صيغ للتجميع من أجل إرسال عدة أقنية في آن على ليف مفرد من أجل كل من التعديلين الرقمي والتماثلي . وبالمقابل يمكن ارسال أقنية مستقلة على الياف منفصلة مجمعة جميعها ضمن كابل مفرد . تصلح هذه الخطة للعمل الا أنها مكلفة ولا تستغل كليا امكانيات النطاق العريض للألياف . ربما قد ادركت ان تركيب كابل ليفي لم تستخدم فيه السعة الكلية لحمل المعلومات يمكن ان يكون عملياً وان النظام يمكن ان ترتفع قيمته بواسطة اضافة تسهيلات ارسال واستقبال جديدة من غير تغيير الكابل الليفي المركب سابقاً .

يمكن ان تصنف خيارات طول الموجة كما يلي : العمل ضمن الطيف المرئي (من 0.4 μm الى 0.7 μm) والعمل قرب المنطقة تحت الحمراء (بقرب 0.85 μm) أو العمل بالامواج الطويلة (من 1.1 μm الى 1.6 μm) . تصبح خسارات الليف في الطيف المرئي مرتفعة نوعاً ما . وهكذا تكون فقط الوصلات القصيرة عملية . في بعض الظروف الخاصة تولد المعلومات مباشرة على حزمة ليزر مرئية وتكون الغاية من الوصلة ارسال هذه المعلومات بدون تحويلها الى طول موجة آخر وفي هذه الحالة يتم اختيار الليف ذي الخسارة الاقل عند طول الموجة المرغوب . ان تخميد الزجاج بقرب 0.85 μm صغير وقد طورت بشكل كبير منابع الضوء ومكاشيفه . حيث تم في هذه المنطقة تصميم الجيل الاول من

الاتصالات الليفية . وستبقى منطقة قيّمة من أجل الوصلات الليفية . ان أفضل كفاءة ارسال تحدث عند اطوال موجة أعلى . وإضافة لذلك يكون تشوه الاشارة الناتج عن الارسال أقل في هذه المنطقة . لهذه الاسباب تكون اطوال الموجة الاعلى جذابة من اجل المسافات الطويلة ومعدلات معلومات كبير .

لقد أصبحت المنابع والمكاشيف عند (1.1-1.6 μm) عملية في بداية الثمانينات بعد فترة طويلة من تطوير أجهزة كهذه من أجل المنطقة قرب تحت الحمراء . كانت النتيجة ميزات الكلفة والجاهزية والوثوقية لمكونات ما قرب تحت الحمراء .

ان منابع الضوء الرئيسية المتوفرة هي الثنائي الباعث للضوء LED وثنائي الليزر LD . ان عنصر LED أرخص ويتطلب دارات أبسط . يقدم عنصرLD في الخرج حاملاً ذا طيف خرج أضيق مما يقدمه عنصرLED . ويكون بث LD الى درجة كبيرة ترددا مفرداً . ويمكن بحوامل ذات طيف أضيق بناء أنظمة طويلة بسعة حمل معلومات اكبر . ويمكن أيضاً تعديل LD بمعدلات اعلى من LED . ان الاعتبارات التي تدخل في اختيار منبع الضوء المناسب هي كلفة الدارة والعناصر وموثوقيتها وعمرها . ان تعليب المنبع مهم أيضاً فبنية تسمح بالربط السهل لليف هو أمر مرغوب فيه .

يوجد مجال واسع لاختيار الالياف وتتضمن الفروق فيما بينها الحجم والمادة (زجاجا أو بلاستيكا أو زجاجا مكسواً بالبلاستيك) وسهولة اقتران الضوء اليها والتخميد وسعة حمل المعلومات (نسبة الى تشوه الاشارة في الارسال) . تقسم التغيرات البنيوية الى أدلّة موجية نوع دليل درجي (SI) ودليل متدرج (GRIN) . تتضمن مميزات الانتشار سلوك الموجة وحيد الاسلوب ومتعدد الاسلوب وسوف نحدد ونوضح هذين المصطلحين فيما بعد . اما الان فنرغب فقط ان نرسخ الفكرة بأنه ليست جميع الالياف متساوية حيث توجد الياف مختلفة من أجل اغراض مختلفة .

ان الكابل الذي يحتوي على الالياف ويحميها يمكن ان يوصف بشكل مستقل عن الليف وهذا حقيقي مبدئيا على الأقل . فعندما يتوجب على نظام ان يتحمل محيطا قاسيا على وجه الخصوص من الضروري ان نصمم كابلا قادراً ان

يتحمل قساوة الاستعمال . ان وصلة عبر المحيط مثلا تتطلب كابلا أعد خصيصا لهذا الغرض . ومن أجل ظروف أبسط سيكون اكثر اقتصادياً ان نخصص كابلا ليفيا معياريا ان كان يمكنه ان يحقق متطلبات النظام . تتضمن الفروقات في الكابل حزمة وحيدة الليف أو متعددة الليف وكابلاً مخصصا للمهمات الصعبة أو للمهمات الخفيفة . ان الحزمة متعددة الليف مهيئة من أجل الارسال متعدد الاقنية أو من اجل الارسال الاضافي لرسالة مفرده . وفي بعض الاحيان يكون تركيب كابل متعدد الالياف ذا معنى عندما نحتاج الى ليف واحد فقط أو إلى بضعة الياف منها . ويمكن استعمال الالياف الأخرى فيها بعد عندما تظهر الحاجة الى زيادة في عدد أقنية المعلومات . ان الغاية من الكابل هي حماية الليف من الحك واعطاء مقاومة ضد السحق . تحتوي الكابلات عناصر تقوية للتخفيف من اجهادات الشد . يصبح هذا التخفيف مهماً عندما يتطلب الامر سحب الكابل ضمن مجاري أو عندما يجب ان يتحمل الكابل وزنه الخاص اثناء التركيب والتشغيل .

اشارت مناقشتنا السابقة عن الموصلات الى كلفتها العالية الممكنة وخسارتها الكبيرة . عند تصميم نظام ما تحسب خسارة الوصلة الكاملة من أجل تقرير فيما اذا كانت ستتوفر قوة اشارة كافية من أجل وضوحية الاستقبال المطلوبة . ولأجل هذا السبب يجب ان تعرف خسارات كل الموصلات والوصلات الدائمة . ويوجب هذا ان يختار المصمم موصلات خاصة وتقنيات التوصيل ويتأكد ان قيم الخسارة المستعملة في تحليل النظام صحيحة . وبالاضافة الى حصولنا على خسارة صغيرة يجب التأكد من متانة الموصل . حيث يجب ان يقدم نفس الخسارة عند عمليات توصيل وفصل متكررة ويجب ان يكون تركيبه سهلاً .

يجب على المصمم ان يختار مكشافاً ضوئيا مناسبا من أجل تحويل الاشارة البصرية الى الشكل الكهربائي . ان الحجم الصغير وقدرة التشغيل المنخفضة للثنائيات الضوئية من أنصاف النواقل يجعل منها مكاشيف مفضلة من أجل الانظمة الليفية ويوجد مجال واسع من الثنائيات يمكن الاختيار منها . والاهم هو أن يكون الثنائي عالي الاستجابة عند طول موجة المنبع الضوئي . وتتضمن

الاعتبارات الأخرى زمن الاستجابة وبساطة دارة الاستقبال المطلوبة ومميزات الضجيج وسهولة الربط الى مخرج الليف . يوجد ترتيبات تعليب مختلفة تسهل هذا التوصيل ويجب على المصمم ان يقرر فيها اذا كان الأمر يحتاج الى مكشاف ذي تكبير داخلي . يستعمل الثنائي الضوئي الانهياري لهذا الغرض . انه اكثر كلفة ويتطلب دارة اكثر تعقيداً من مكشاف بدون ربح اشارة داخلي الا أن المستقبل الناتج يتمتع بحساسية محسنة .

يجب تصميم دارات مرسل ومستقبل فإذا كان لابد من شرائها يجب عندئذ تحديد المواصفات . سنقدم بعض الدراسات الاساسية عندما نناقش التعديل والكشف ، وفي انظمة المسافات الطويلة قد تظهر الحاجة الى مكررات الا انها غير مرغوبة لانها تضيف الى النظام الاولي كلفة وتعقيدا ونفقات صيانة متزايدة . وان توفير القدرة لها عند المواقع البعيدة يمكن ان يكون مشكلة أيضاً . واذا تطلب الامر مكررات سيقرر مصمم النظام العدد المطلوب والمسافات بينها .

اننا الآن جاهزون لنباشر دراسة التفاصيل العديدة التي ستساعد في اتخاذ القرارات التي أوجزناها في هذه الخلاصة .

مسائل الفصل الأول

1 ـ 1 ـ احسب بالديسيبل الجزء من القدرة النافذة وارسمه بيانياً وذلك كتابع لخسارة خط الإرسال على ورق لوغاريتمي من أجل مدى خسارة من صفر إلى 50 dB .

1 ـ 2 ـ تدخل قدرة بصرية مقدارها 1 mW ليفاً . احسب قدرة الخرج وارسمها بيانياً وذلك كتابع لخسارة الليف من أجل مدى خسارة من صفر إلى 50 dB .

1 ـ 3ـ يوصل ليفان طولهما 1 km توصيلاً دائماً . خسارة كل ليف 5 dB وخسارة الوصلة الدائمة 1 dB . إذا كانت القدرة الداخلة 2 mW فكم تبلغ القدرة المستَلمة في نهاية خط الإرسال المركّب هذا ؟

1 ـ 4 ـ يتطلب مستقبلٌ قدرةَ دخل مقدارها 10 nW . فإذا كانت خسارات النظام تصل حتى 50 dB فكم تبلغ القدرة المطلوبة من المنبع ؟

1 ـ 5 ـ كم يبلغ وزن ميل واحد من الكابل المحوري RG-19/U ؟

1 ـ 6ـ يستعمل الكابل المحوري RG-19/U عند تردد 100 MHz وقدرة دخل 10 mW . فإذا كانت حساسية المستقبل 1 μW احسب أعظم طول لوصلة اتصالات ؟ وكرر الحساب من أجل ليف ذي خسارة 5 dB/km يحل محل الكابل المحوري .

1 ـ 7 ـ إذا كان معدل الإرسال الهاتفي عند السوية T3 هو 44.7 Mbps . وكانت كل رسالة هاتفية تشغل 64.000 bps. فكم عدد الرسائل التي يمكن إرسالها سوية على هذا النظام ؟. في النظام الفعلي تستعمل 672 قناة رسالة بينما تستعمل النبضات الإضافية لوظائف أخرى كالتزامن .

1 ـ 8 ـ قدِّر عدد النبضات الضوئية التي يمكن إرسالها بالثانية بواسطة نظام ضوئي وامض يعمل يدوياً . ماذا تستنتج عن سعة (إمكانية) معلومات النظام اليدوي هذا بالمقارنة مع وصلات هاتفية ليفية بصرية حديثة ؟

1 ـ 9 ـ يحتوي كابل ليفي هاتفي 144 ليفاً ويستطيع كل ليف أن يحمل 672 رسالة صوتية . ويحتوي كابل معدني هاتفي 900 زوجاً من الأسلاك النحاسية المجدولة ويمكن أن يحمل كل زوج 24 رسالة . قارن امكانيتي الكابلين الليفي والمعدني . كم عدد الكابلات المعدنية المطلوبة لكي تساوي إمكانية الكابل الليفي ؟ كرّر الحساب إذا كان كل ليف يعمل عند معدل التأشير DS-4 (DS-4 signaling rate) .

1 ـ 10 ـ يبلغ قطر كابل ليفي هاتفي يحتوي 144 ليفاً 12.7 mm . ويبلغ قطر كابل نحاسي يحتوي 900 زوجاً من الأسلاك حوالي 70 mm . احسب نسبة مساحتي المقطعين لهذين النوعين من خطوط الإرسال .

1 ـ 11 ـ اكتب جدولاً وحدّد على العمود الأول منه الترددات التالية : $10^{14}, 10^{10}, 10^{9}, 10^{6}, 10^{4}\times2, 10^{3}, 60, 10$ هرتز . واكتب على العمود الثاني أطوال

الموجة بالمتر المقابلة لهذه الترددات . واكتب على العمود الثالث اسم المنطقة المقابلة من الطيف الكهرمغناطيسي .

1 ـ 12 ـ احسب الترددات عند حواف الطيف المرئي . واحسب عرض نطاق الطيف المرئي أيضاً (أي الفرق بين أعلى ترددات مرئية وأخفضها) .

1 ـ 13 ـ احسب طاقة الفوتون عند $\lambda = 1.3\ \mu m, 0.82\ \mu m, 0.6\ \mu m$ وأيهما يملك طاقة أكبر ، فوتون الأشعة المرئية أم فوتون الأشعة تحت الحمراء ؟ .

1 ـ 14 ـ يرد 10^{10} فوتون بالثانية عند طول موجة $0.8\ \mu m$ على مكشاف ضوئي . احسب القدرة الواردة على المكشاف . وإذا كان هذا المكشاف يحول الضوء إلى تيار بمعدل $0.65\ \mu A/\mu W$. فما هي شدة التيار الناتج ؟ .

1 ـ 15 ـ كم هو عدد الفوتونات التي تصل بالثانية إلى مستقبِل إذا كانت القدرة 1 nW عند طول موجة $1.3\ \mu m$ ؟ .

1 ـ 16 ـ افترض انه يمكن لنظام رقمي أن يعمل بمعدل معطيات يساوي 1٪ من تردد الحامل . احسب معدل البتّات المسموح به باستعمال حوامل ذات ترددات : 1 kHz و 1 MHz و 100 MHz و 10 GHz وطول موجة $1\ \mu m$. ان هذه المسألة تبرهن كيف يمكن ان تتزايد إمكانية النظام بتزايد التردد الحامل (أحد المزايا الرئيسية للإرسال البصري عن الإرسال بالتردد الراديوي) .

1 ـ 17 ـ ارسم 30 دورة لموجة جيبية تتذبذب بتردد 10^6 Hz . وارسم هذه الموجة الجيبية إذا عدِّلت بموجة مربعة ذات معدل تكرار 10^5 نبضة بالثانية (pps) . ما هي المشكلات التي تحدث عندما يقترب معدل التكرار من تردد الحامل ؟ .

1 ـ 18 ـ كم عدد الأقنية الصوتية التي يمكن تعديلها عند طول موجة 1.06 μm ؟ افترض عرض نطاق نظام مساوٍ إلى 1٪ من تردد الحامل .

1 ـ 19 ـ اقترح تطبيقاً بصرياً ليفياً غير الذي ذكر سابقاً في الكتاب . وارسم المخطط الكتلي للنظام . وسجل في قائمةٍ خواصَ نظامك ومتطلباته (اعط مثلاً عرض نطاق المعلومات ومعدل البيانات وطول الخط . . . . الخ) .

1 ـ 20 ـ افترض انه يوجد هاتف في كل منزل على الأرض . وإذا كان يتوجب ان ترسل بذات الآن وعلى خط إرسال واحد باستعمال تجميع التقسيم الترددي . فما هو عرض النطاق الأدنى المطلوب ؟ وهل يمكن لحزمة بصرية وحيدة أن تحمل هذه الإشارة المجمَّعة ؟ (افترض أن عدد المنازل 10 بليون) .

1 ـ 21 ـ افترض تعديلاً رقمياً للمسألة (1 ـ 20) وتجميعاً حسب التقسيم الزمني و 64,000 bps لكل رسالة صوتية . ما هو معدل البتّات المطلوب لإرسال الإشارة المجمَّعة ؟ هل يمكن لحزمة بصرية وحيدة أن تحمل هذه الإشارة ؟

المراجع

الفصل الأول

1. Forrest M.Mims, III. "Alexander Graham Bell and the Photophone: The Centennial of the Invention of Light-Wave Communications, 1880-1980." *Optics News* 6, no. 1 (1980): 8-16.
2. Mischa Schwartz. *Information, Transmission, Modulation, and Noise.* 3rd ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1980. pp. 138-40, 157-58.
3. Manufacturer's literature. Elizabeth, N.J.: Alpha Wire Corporation.
4. Ibid.
5. Thomas G. Giallorenzi, Joseph A. Bucaro, Anthony Dandridge, G. H. Sigel, Jr., James H. Cole, Scott C. Rashleigh, and Richard G. Priest. "Optical Fiber Sensor Technology." *IEEE J. Quantum Electorn.* 18, no. 4 (April 1982): 626-65.

الفصل الثاني

مراجعة البصريات

يحتوي هذا الفصل المفاهيم الاساسية للبصريات التقليدية التي تطبق على الاتصالات الليفية وقد دعوناها مراجعة لان معظمكم قد درس البصريات في مقرر الفيزياء في المدرسة أو في الكلية . والمادة الحالية تثبِّت لدى القارىء بعض الاسس عن الاشعة والامواج والعدسات . ومن أجل أولئك الذين ليسوا على اطلاع على البصريات التقليدية يعتبر هذا الفصل بالنسبة لهم مدخلاً جيداً لبعض المواضيع المفيدة . ان مواضيع هذا الفصل هي نظرية الشعاع (Ray Theory) والتبئير (Focusing) والتوازي (Collimating) وتكوين الصورة (Imaging) وخواص العدسات (Lenses) في تجميع الضوء . تنطبق هذه المواضيع على مشاكل اقتران الضوء من المنابع الى الالياف وكذلك اقتران الضوء من أحد الألياف الى ليف آخر .

(2 ـ 1) ـ نظرية الشعاع والتطبيقات

Ray Theory and Applications

ان عدداً من الظواهر البصرية (وعلى وجه الخصوص تلك المتعلقة بالعدسات) تفسر بشكل ملائم على اعتبار الضوء كأشعة ضيقة وتدعى النظرية

المؤسسة على هذا الاعتبار البصريات الهندسية وتخضع هذه الاشعة لبضع قوانين بسيطة هي :

1 ـ تنتشر الاشعة في الفراغ بسرعة : $c=3\times10^8$ m/s. وتنتشر الاشعة في أي وسط آخر بسرعة أقل وتعطى بالعلاقة :

$$v = \frac{c}{n} \quad (1\text{-}2)$$

جدول (2 ـ 1) ـ دليل الانكسار لبعض المواد

المادة	دليل الانكسار
هواء	1
ثاني أوكسيد الكربون	1
كحول الإيتيل	1.36
ماء	1.33
سيليكا منصهرة	1.46
زجاج	1.5
بوليستيرين	1.59
سيليكون	3.5
جرمانيوم	4
ياقوت أزرق	1.8
الكالسيت (كربونات الكالسيوم المتبلورة)	1.6
كلورايد الصوديوم	1.54
فلورايد المغنيزيوم	1.38
سلفايد التوتياء	2.3
زرنيخ الغاليوم	3.35
زرنيخ غاليوم الالومنيوم	3.6

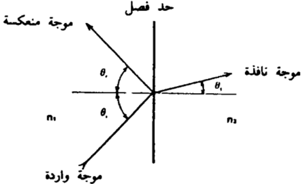
يدعى العامل n دليل الانكسار للوسط . من أجل الهواء والغازات تكون سرعة الشعاع قريبة جدا من c وتكون $n \approx 1$. وعند الترددات البصرية يكون دليل الانكسار للماء 1.33 أما الزجاج فله عدة تراكيب ولكل واحد منها سرعة شعاع مختلفة قليلاً . ويعتبر عامل انكسار بقيمة 1.5 رقما ممثلاً لانواع الزجاج المستعمل في الالياف . يعطي الجدول (2 ـ 1) قائمة لأدلّة الانكسار لعديد من المواد .

2 ـ تنتشر الاشعة وفق مسار مستقيم مالم تنكسر نتيجة تغير ما في الوسط .

3 ـ عند المستوى الفاصل بين وسطين ينعكس الشعاع بزاوية تساوي زاوية الورود كما يوضحه الشكل (2 ـ 1) . لاحظ أن الزوايا تقاس بالنسبة الى العمود على المستوى الفاصل (أي الاتجاه المتعامد مع السطح) . وهذا هو الاصطلاح المتفق عليه في العمل البصري . فبالاشارة الى الرسم يكون :

$$\Theta_r = \Theta_i \qquad (2\text{-}2)$$

حيث Θ_i هي زاوية الورود و Θ_r هي زاوية الانعكاس .



شكل (2 ـ 1) ـ الاشعة الواردة والمنعكسة والنافذة عند مستوى فاصل بين وسطين .

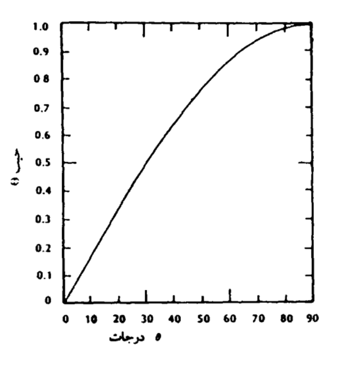
4 ـ عندما تجتاز أي قدرة حداً فاصلاً يعطى اتجاه الشعاع النافذ بقانون Snell كما يلي :

$$\frac{\sin \Theta_t}{\sin \Theta_i} = \frac{n_1}{n_2} \qquad (3\text{-}2)$$

حيث Θ_t هي زاوية النفاذ و n_1 و n_2 هما دليلا الانكسار لمنطقتي الورود والنفاذ على التوالي .

ان الزوايا التي لها دلالة فيزيائية في الفقرات السابقة هي تلك التي تقع بين $0°$ و $90°$ فقط . يبين الشكل (2 ـ2) المنحنى البياني للتابع الجيبي لهذا المدى . اذا كانت n_1 أصغر من n_2 يكون $\sin \Theta_t < \sin \Theta_i$ بحسب قانون Snell وكما يشير الشكل (2 ـ2) يكون للزوايا الاصغر قيما جيبية أصغر أي $\Theta_t<\Theta_i$ في هذا المثال . وتكون زاوية النفاذ أصغر من زاوية الورود . من المفيد انه عندما نرسم أشعة تنتقل من وسط الى وسط آخر ان نتذكر هذه النتيجة ويمكننا أن نوجزها كما يلي :

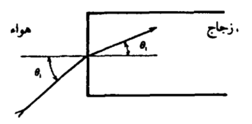
آ ـ ينحني الشعاع النافذ باتجاه المستقيم العمود عندما ينتقل من وسط ذي دليل انكسار منخفض الى وسط ذي دليل انكسار أعلى .



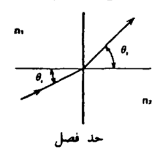
شكل (2 ـ 2) ـ التابع الجيبي

يوضح الشكل (2 ـ 3) هذا الوضع من أجل شعاع يدخل من الهواء إلى ليف زجاجي . واذا كانت $n_1>n_2$ يعطي قانون Snell عندها $\sin \Theta_t> \sin \Theta_i$ وتكون $\Theta_t > \Theta_i$ وينحني الشعاع بعيدا عن العمود كما يبينه الشكل (2 ـ 4) . وتكون النتيجة التي يجب تذكرها هي :

ب ـ ان الشعاع النافذ ينحني بعيدا عن المستقيم العمودي عندما ينتقل من وسط ذي دليل انكسار كبير الى وسط ذي دليل انكسار أصغر .



شكل(2 ـ 3) ـ انحناء الشعاع الضوئي عند دخوله ليف زجاجي



شكل (2 ـ 4) ـ عندما تكون $n_1>n_2$ ينحني الشعاع بعيدا عن القائم باتجاه السطح الفاصل .

مثال :

يعبر شعاع ضوئي من الهواء $(n_1=1)$ الى الزجاج $(n_2=1.5)$. أوجد زوايا النفاذ عندما $\Theta_i=0°$ (الشعاع الوارد عمودي على السطح الفاصل) وعندما $\Theta_i=15°$

الحل :

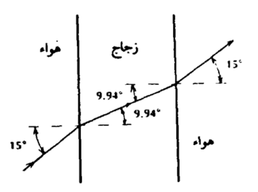
عندما تكون زاوية الورود صفراً يكون عندئذ $\sin\Theta_i=0$. وبحسب قانون Snell ينتج : $\sin\Theta_t=0$ وأخيرا $\Theta_t=0$ فلا ينحرف الشعاع . وعندما تكون $\Theta_i=15°$ يكون :

$$\sin\Theta_t=(1/1.5)\sin 15°=0.17$$

و $\Theta_t=9.94°$. وكما هو متوقع يتجه الشعاع نحو العمود .

مثال :

ينتقل الشعاع الأخير في المثال السابق من الزجاج عائداً إلى الهواء . بافتراض أن السطح الفاصل الثاني هذا مواز للسطح الأول . تكون زاوية الورود الجديدة 9.94° كما يمكن أن يحدده الشكل (2 ـ 5) . أوجد اتجاه الشعاع النافذ .



شكل (2 ـ 5) ـ لا ينحرف الشعاع بعد اجتيازه صفيحة زجاجية متوازية الوجهين .

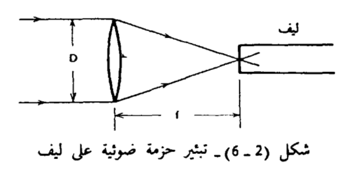
الحل :

من قانون Snell يكون $\sin \Theta_t = 1.5 \sin 9.94° = 0.259$ وتكون عندئذ $\Theta_t = 15°$. وينحني الشعاع النافذ بعيداً عن المستقيم العمود . إضافة لما ورد وبجمع نتيجتي هذين المثالين الاخيرين نجد أن شعاعاً وارداً على صفيحة متوازية الوجهين من الزجاج لا يتعرض لانحراف نهائي . وهذا صحيح دائما كما يبينه الشكل (2 ـ 5) حيث يدخل الشعاع الزجاج بزاوية 15° وينحرف نحو العمود بزاوية 9.94° وينحرف ثانية ليوازي اتجاهه الاصلي بزاوية 15° . سيكون تحول الشعاع (الازاحة الجانبية) مهملاً اذا كانت ثخانة الزجاج قليلة .

(2 ـ 2) ـ العدسات Lenses

يمكن اختبار الالياف بارسال حزم ضوئية مرئية خلالها . وان أبسط الاختبارات هي الخاصة بالاستمرارية (اي الاختبار والتحقق من وجود انقطاع

في الليف) وكذلك الاضرار الفيزيائية الخفيفة التي تسبب خسارات صغيرة فقط . يمكن إجراء اختبار الاستمرارية بملاحظة فيما اذا كان ينبثق أي ضوء من نهاية الليف . يمكن تحديد مواقع التشققات أو عدم التجانس في ليف عارٍ (ليف غير موجود داخل كابل) بملاحظة الضوء المتناثر من هذه المواقع . ان ليزرات الغاز تلائم هذه الاختبارات . وحيث ان حزم الخرج لها ذات أقطار من فئة المليليمتر (أما الالياف فهي أصغر بكثير) فتستعمل العدسات لتبئير الضوء على وجه نهاية الليف كما يوضحه الشكل(2 ـ 6) .



شكل (2 ـ 6) ـ تبئير حزمة ضوئية على ليف

ومن أجل تسهيل مناقشتنا سنعتبر العدسات الرقيقة فقط . نقول عن عدسة أنها رقيقة اذا كانت ثخانتها صغيرة لدرجة يكون معها تحول الشعاع الذي يخترقها مهملاً . بكلمات اخرى تدخل الاشعة العدسة وتغادرها عند نفس المسافة تقريبا من محاور العدسة . وسنفترض في البداية أن عدساتنا مثالية وليس لها خسارات امتصاص أو انعكاس ولا تنتج أي زيغ (aberrations) وسنضيف فيما بعد هذه التعقيدات اذا ظهرت أهميتها .

نرى على الشكل (2 ـ 6) حزمة متوازية من الضوء (حزمة مسددة) مبأرة على نقطة . تنتشر هذه الحزمة موازية لمحور العدسة . ويتكون الضوء الوارد من عدد من الاشعة المتوازية الا أنه يُرسم على الشكل الشعاعان الاكثر بعداً فقط . تتقارب جميع الاشعة نحو النقطة المبينة المعروفة بالنقطة البؤرية التي تبعد مسافة f من العدسة وتدعى البعد البؤري . ويدعى المستوى الذي يمر خلال النقطة البؤرية ويتعامد مع محور العدسة المستوى البؤري . للعدسة ذاتها سطحان كرويان . تخيل العدسة كما لو كانت مكونة من توصيل قمتي كرتين زجاجيتين

نصفي قطريها (تقوسيها) R_1 و R_2 . قطر العدسة D ودليل انكسارها n . يمكن حساب بعدها البؤري من المعادلة التالية :

$$\frac{1}{f} = (n - 1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \qquad (4\text{-}2)$$

وتدعى النسبة f/D الرقم البؤري للعدسة .

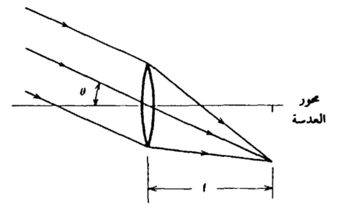
يمكن بسهولة الحصول على بعد بؤري كبير بجعل R_1 و R_2 كبيرين بمعنى ان يكون للعدسة سطحان مسطحين تقريباً . اما العدسات ذات البعد البؤري الصغير فان تصنيعها أصعب نظراً لأن تقوسها يجب ان يكون صغيرا فينتج عدسات صغيرة . نورد فيما يلي حالة محددة توضح المشكلة . لنعتبر عدسة ولتكن كرة كاملة من الزجاج . اذا كان قطر العدسة ثابتا فان هذا التصميم يعطي أصغر تقوسات ممكنة وبالتالي أصغر بعد بؤري ممكن . في هذا المثال يكون نصف قطر الكرة هو تقوس العدسة ويكون قطر العدسة يساوي ضعفي التقوس . أي أن :

$$R_1 = R_2 = \frac{D}{2}$$

وباستعمال هذه القيم في المعادلة (2 ـ 4) ينتج : $f = \dfrac{D}{4\,(n-1)}$

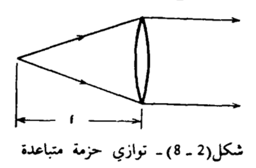
ومن أجل n=1.5 نستنتج ان الرقم البؤري للعدسة f/D=0.5 أي ان طولا بؤريا صغيرا يتطلب قطر عدسة صغير . ان عدسة كهذه سيكون لها زيغ كروي حاد مؤدياً الى ان البقعة البؤرية في الشكل (2 ـ 6) ستضعف معالمها بشكل ملحوظ . ان لمعظم العدسات ارقام بؤرية اكبر من 0.5 وذلك من اجل تصحيح هذه المشكلة ويزيد هذا من صعوبة الحصول على ابعاد بؤرية صغيرة . وعندما تستعمل عدسة ما لكي تقرن الضوء من حزمة ليزرية غازية الى ليف قد لا يبدو الزيغ مهما . وقد يعود هذا الى أن قطر الليف ، بالرغم من صغره ، ليس متناهيا في الصغر . ومن أجل الاقتران لا تحتاج الحزمة ان تكون مبأرة في نقطة ويجب فقط أن تصغّر الى حجم أصغر من نواة الليف .

ان الاشعة الضوئية المتوازية التي ترد بزاوية ما بالنسبة الى محور العدسة تتمركز في المستوى البؤري كما يبينه الشكل (2 ـ 7) . ويتحدد موقع النقطة البؤرية من تقاطع الشعاع المركزي مع المستوى البؤري . ان الشعاع المركزي (وهو الشعاع الموجّه مباشرة نحو مركز العدسة) لا ينحرف بواسطة عدسة رقيقة لان الشعاع يدخل ويغادر عند سطحين متوازيين تقريبا . لقد أوضحنا في المقطع السابق . ان الشعاع الوارد على صفيحة زجاجية ذات جانبين متوازيين لا يتعرض لانحراف واضح .

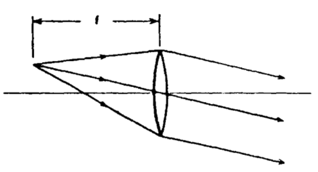


شكل (2 ـ 7) ـ تبئير حزمة منحرفة عن المحور

يمكن لعدسة رقيقة ان تصدر حزمة متوازية بدءاً من نقطة كما يبينه الشكل (2 ـ 8) . اذا وقع منبع الضوء عند النقطة البؤرية تنتشر الحزمة النافذة موازية لمحور العدسة . واذا وقع المنبع في أي مَكان آخر في المستوى البؤري فإن الحزمة النافذة ستكون متوازية من جديد الا أن اتجاهها سيختلف . وكما يبينه الشكل (2 ـ 9) ستنتشر هذه الحزمة في اتجاه الشعاع الواصل بين المنبع ومركز العدسة وكما ذكر سابقا فان هذا الشعاع لا ينحرف .



شكل(2 ـ 8) ـ توازي حزمة متباعدة



شكل(2 ـ 9) ـ توازي منبع نقطي يقع خارج المحور

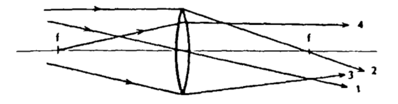
يبين الشكل (2 ـ 10) قوانين رسم الاشعة خلال عدسة رقيقة وهذه القوانين هي :

1 ـ الاشعة المارة في مركز العدسة لا تنحرف .

2 ـ الاشعة الواردة موازية لمحور العدسة تمر في النقطة البؤرية بعد نفاذها من العدسة .

3 ـ الشعاع الوارد موازيا للشعاع المركزي يقطعه في المستوى البؤري بعد نفاذه من العدسة .

4 ـ الشعاع الوارد ماراً في النقطة البؤرية ينتشر موازيا لمحور العدسة بعد نفاذه من العدسة.

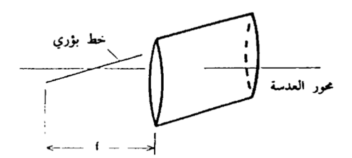


شكل(2 ـ 10) ـ مسارات الشعاع خلال عدسة رقيقة . تشير الارقام الى القوانين المذكورة في النص .

ستمكنك هذه القوانين من رسم الاشعة من أجل حالات التبئير والتسديد المتوازي وتكوين الصورة باستعمال العدسات الرقيقة .

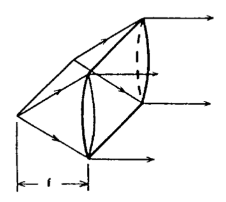
للعدسات الاسطوانية سطوح هي عبارة عن أجزاء من اسطوانات كما هو مبين في الشكل (2 ـ 11) وهذه العدسة تحرف الاشعة في اتجاه واحد فقط (وهو

عمودي في الشكل 2 ـ 11) . ان العدسة الاسطوانية هي نوع أحادي البعد من العدسة الكروية . في الواقع ان المعادلة (2 ـ 4) صحيحة من أجل العدسة الاسطوانية حيث R_1 و R_2 هما تقوسي الوجوه الاسطوانية . يحدد البعد



شكل (2 ـ 11) ـ عدسة اسطوانية

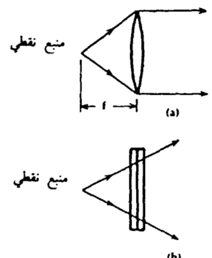
البؤري f خطاً (الخط البؤري) موازياً لمحاور السطوح الاسطوانية وعلى مسافة f من العدسة ويمر في محور العدسة (انظر الشكل 2 ـ 11) . ان الضوء الصادر من منبع خطي موضوع على طول الخط البؤري سينفذ من العدسة متوازيا . ويبين الشكل (2 ـ 12) مسارات الشعاع . وبالمثل اذا دخلت العدسة حزمة متوازية من الاشعة وانتشرت موازية لمحور العدسة ستتبأر على خط وعلى مسافة مقدارها بعد بؤري من العدسة . من المفيد ان نعتبر آثار عدسة اسطوانية على منبع نقطي



شكل(2 ـ 12) ـ توازي منبع خطي

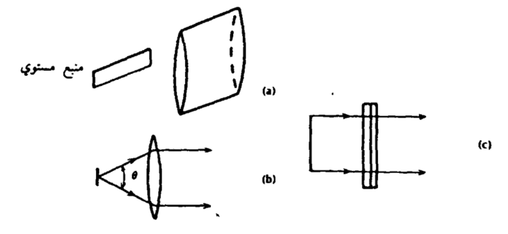
موضوع على طول الخط البؤري . ان الضوء الصادر عن العدسة سيتوازى شاقوليا الا انه سيواصل امتداده أفقياً ويوضح الشكل (2 ـ 13) هذه الظاهرة .

ان النقطة التي يجب تذكرها هي ان العدسات الاسطوانية تعمل مثل العدسات الكروية في اتجاه واحد وليس لها أي تأثير في الاتجاه المتعامد . وهذه الخاصية



شكل (2 ـ 13) ـ منبع نقطي وعدسة اسطوانية .
(a) ـ منظر جانبي يبين التوازي و (b) ـ منظر رأسي

مفيدة من أجل بصريات الليف وذلك لأن الضوء المنبعث من الثنائيات الليزرية والثنائيات الباعثة للضوء ينتشر غالبا بشكل غير متناظر . أي ان الضوء المنبعث ينتشر بسرعة اكبر في اتجاه ما (الاتجاه الشاقولي) من انتشاره في الاتجاه الأخر (الاتجاه الافقي) . يمكن لعدسة اسطوانية ان تجعل الحزمة تنتشر بشكل اكثر



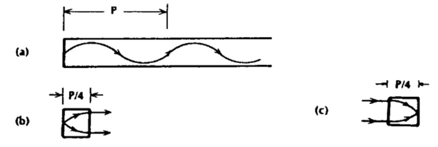
شكل(2 ـ 14) ـ (a) ـ يتوازى الضوء من منبع غير متناظر بواسطة عدسة اسطوانية .
(b) ـ منظر جانبي (c) ـ منظر رأسي .

تناظراً وذلك بانقاص الزاوية الاكبر من بين زاويتي التباعد . وتظهر هذه الامكانية على الشكل (2 ـ 14) . ان بث المنبع له انتشار حزمة مهمل في أحد الاتجاهين .

العدسة القضيبية ذات الدليل المتدرج أو قضيب (GRIN)

The Graded Index Rod Lens

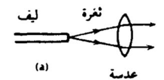
وهو تطوير حديث طبق على أنظمة ليفية بعدة طرق . ان القضيب ذا الدليل المتدرج ذو دليل انكسار يتناقص مع البعد عن محوره . فيسبب هذا انتشار الاشعة الضوئية في مسارات جيبية (انظر الشكل 2 ـ 15) . (تحتوي الفقرة (5 ـ 2) مناقشة أشمل لمسير شعاع في قضيب ذي دليل متدرج) يدعى طول دورة كاملة واحدة خطوة العدسة P . لاحظ ماذا سيحدث اذا قطعنا قضيبا

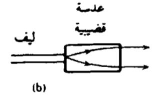


شكل(2 ـ 15) ـ قضيب ذو دليل متدرج . (a) ـ مسار شعاع نموذجي . (b) ـ عدسة ربع خطوة توازي الضوء المنبعث من نقطة . (c) ـ عدسة ربع خطوة تبئر حزمة ضوء متوازية .

بطول ربع خطوة . ان الضوء من المنبع النقطي الموضوع في مركز القضيب سيتوازى كما يبينه الشكل (b-15-2) . اما الضوء المتوازي الداخل الى هذه العدسة سيتبأر كما في الشكل (c-15-2) . من الواضح ان لقضيب GRIN خواص تبئير وتوازي كما للعدسات الكروية التقليدية. يفيد قضيب GRIN أيضاً من أجل تكوين الصورة . يتميز القضيب بامكانية الحصول على اطوال بؤرية صغيرة مما يسمح بصنع بنى بصرية صلبة وقصيرة . مثلا : ان الضوء المنبعث من نهاية ليف يمكن توازيه بواسطة عدسة عادية كما في الشكل (a-16-2) أو بواسطة عدسة قضيبية كما في الشكل (b-16-2) . باستعمال عدسة كروية سيكون هناك ثغرة

هوائية بين الليف والعدسة وليس الامر كذلك عند استعمال عدسة قضيبية . ويمكن الصاق الليف بالقضيب مما يعطي بنية ميكانيكية صلبة متواصلة . وسيكون تجميع وتراصف أداة موازاة قضيبية والمحافظة عليها أسهل مما هو لأداة موازاة عدسية كروية .



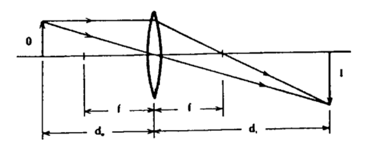


شكل (2 ـ 16) ـ توازي الضوء المشع من ليف . (a) باستعمال عدسة كروية و (b) باستعمال عدسة قضيب GRIN

(2 ـ 3) ـ تكوين الصورة Imaging

يوضح الشكل (2 ـ 17) تكون الصور بواسطة عدسة رقيقة . يعبر عن الجسم بسهم ارتفاعه (O) يبعد مسافة (d_o) عن العدسة فتكون الصورة سهماً ارتفاعه (I) على مسافة (d_i) من العدسة . يمكن ايجاد موقع الصورة برسم الاشعة المنبعثة من رأس الجسم : شعاع أول يمر من مركز العدسة وهو شعاع لا ينحرف بحسب القانون (1) وشعاع ثان يسير موازيا لمحور العدسة فيمر في النقطة البؤرية بعد خروجه من العدسة بموجب القانون (2) . ومن تقاطع هذين الشعاعين تتحدد نقطة الصورة المبأرة الموافقة الى رأس الجسم . وبصورة عامة يحدد تقاطع أي شعاعين صادرين من نفس النقطة موقع صورة تلك النقطة .

لاحظ كيف أن عدسة مفردة تقلب الصورة . تتعلق مواقع الجسم والصورة بمعادلة العدسة الرقيقة كما يلي :



شكل(2 ـ 17) ـ تكون الصورة بواسطة عدسة رقيقة

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \qquad (5\text{-}2)$$

نعبر عن التكبير M كنسبة حجم الصورة الى حجم الجسم ويعطى كما يلي :

$$M = \frac{d_i}{d_o} \qquad (6\text{-}2)$$

ويمكن ان يكون التكبير اكبر من الواحد أو مساوٍ له أو أصغر منه .

مثال :

أوجد بعد كل من الجسم والصورة اذا كان التكبير يساوي الواحد .

الحل :

اذا كان $M=1$ يكون عندئذ $d_i=d_o$ ويكون حينئذ في معادلة العدسة الرقيقة :

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_o} = \frac{1}{f}$$

أو : $d_o=2f$ وأخيراً ايضا $d_i=2f$.

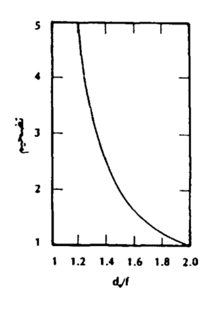
يمكن ضم المعادلتين (2 ـ 5) و(2 ـ 6) لكي نبين العلاقة المباشرة بين التكبير وبعد الجسم فتكون النتيجة هي :

$$M = \frac{1}{d_o/f - 1} \qquad (7\text{-}2)$$

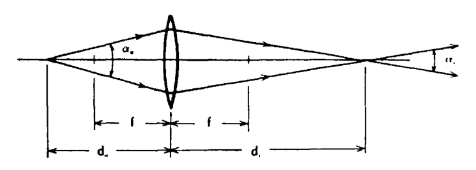
يبين الشكل (2 ـ 18) رسماً بيانياً لهذه المعادلة . من أجل تكبير يزيد عن الواحد يكون مدى مواقع الجسم هو :

$$1 < \frac{d_o}{f} < 2 \qquad (8\text{-}2)$$

عندما نستعمل عدسات شكل (2 ـ 19) لنقرن الضوء الى الألياف من المهم أن نراعي مسار الزوايا التي تنتشر الأشعة الضوئية وفقها . بالرجوع الى الشكل (2 ـ 19) نلاحظ الامتداد الزاوي للضوء ($\propto_o$) عند الجسم والامتداد الزاوي الناتج ($\propto_i$) عند الصورة من أجل نقطة من الجسم على محور العدسة .



شكل (2 ـ 18)
التكبير كتابع لموقع الجسم

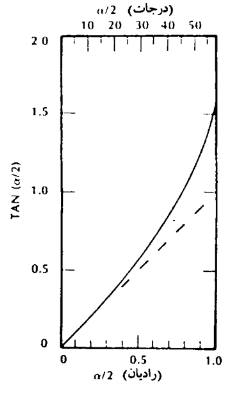


شكل (2 ـ 19) ـ التغيرات الزاوية الناتجة عن تكون الصورة

ان الشكل (2 ـ 19) هو ذات الشكل (2 ـ 17) ما عدا اننا الان نأخذ بعين الاعتبار التغيرات الزاوية بدلاً من التغيرات الحجمية . ان معادلة العدسة الرقيقة لا تزال تتنبأ عن موقع الصورة بدلالة بعد الجسم والبعد البؤري للعدسة . ومن علم المثلثات يتبين أن :

$$\frac{\tan(\alpha_i/2)}{\tan(\alpha_o/2)} = \frac{1}{M} \qquad (9\text{-}2)$$

نرى على الشكل (2 ـ 20) رسماً بيانياً لتابع الظل . لاحظ أن ظل الزاوية يساوي الزاوية ذاتها عندما تكون الزاوية صغيرة ومقيسة بالراديان. وهذا التقريب جيد جداً (الخطأ فيه أقل من 4٪) حتى الدرجة 20° (0.35 راديان) .



شكل (2 ـ 20) ـ يبين الخط المتصل تابع الظل ويمثل الخط المتقطع التقريب $\tan(\alpha/2) = \alpha/2$

يتم التحويل بين الدرجة والراديان باستعمال العلاقة : 1 راديان = 57.3 درجة ، وبافتراض زوايا صغيرة يمكن استبدال توابع الظل في المعادلة (2 ـ 9) بالزوايا ذاتها فينتج :

$$\frac{\alpha_i}{\alpha_o} = \frac{1}{M} \qquad (10\text{-}2)$$

يمكن استعمال هذه المعادلة عندما تكون زوايا نصف المخروط أقل من 20° أي من أجل امتداد حزمة زاوي كامل (α_o أو α_i) حتى 40° . مع أن المعادلة (2 ـ 10) قد وضعت بحالة (α_o و α_i) مقيستين بالراديان فهي أيضا صحيحة عندما يعبر عن (α_o و α_i) بالدرجات .

يمكن ان نستنتج من المعادلة (2 ـ 10) أن زيادة ما في حجم جسم بسبب التكبير يرافقها نقص في امتداد الحزمة . تحاول عدسة تكوين الصورة أن توازي أشعة الضوء التي يصدرها الجسم . وحيث ان ثنائيات الليزر والثنائيات الباعثة للضوء تشع على زوايا واسعة وان الالياف تقبل الاشعة فقط على زوايا صغيرة فيمكن للعدسات ان تزيد من كفاءة الاقتران بين المنابع والالياف .

مثال :

يشع منبع ضوئي ضوءاً بشكل منتظم على منطقة ذات زاوية مخروطية كاملة 40° . والمنبع عبارة عن مشع مستوٍ مربع طول ضلعه 20 μm . صمم نظام عدسة ينقص امتداد الحزمة الى مخروط 10° . وحدّد حجم الصورة .

الحل :

ان نظام تكوين الصورة هو ذاته المبين في الشكل (2 ـ 19) . في هذا المثال $\alpha_o = 40°$ و $\alpha_i = 10°$. يمكن ان نستعمل النتيجة التقريبية في المعادلة (2 ـ 10) لأن $\alpha_o/2$ تساوي 20° فقط . تبين المعادلة (2 ـ 10) ان التكبير يساوي 4 فيؤدي هذا الى : خيال مستوٍ طول ضلعه $4(20) = 80\ \mu m$ ومن أجل تكبير مقداره 4 تبين المعادلة (2 ـ 7) أو الشكل (2 ـ 18) أن $d_o/f = 1.25$ اذا اخترنا عدسة ذات بعد بؤري 10 cm تكون عندئذ $d_o = 12.5\,cm$. وأخيراً تعطي المعادلة (2 ـ 6) بعد الصورة $d_i = Md_o = 50\,cm$.

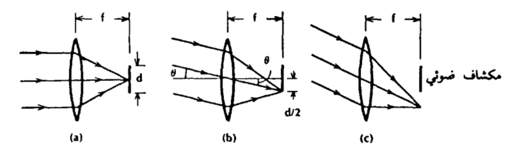
في المثال الأخير يمكن الحصول على ترتيب اكثر تراصاً اذا اخترنا بعداً بؤرياً أصغر بكثير . فمن أجل f=1 mm يكون بعدي كل من الجسم والخيال 1.25 mm و 5 mm على التوالي . ان زيادة في حجم المنبع من 20 μm إلى 80 μm

ستكون مقبولة عندما نقرن ضوءاً إلى ليف ذي قطر نواة من فئة 100 μm أو أكثر .

ان اقتران منبع ذي حجم اكبر من حجم الليف يزيد من المشكلة . اذا حاولنا أن نحصل على حالة معاكسة للتكبير (M<1) سيزداد الامتداد الزاوي حينئذ كما هو متوقع من المعادلة (2 ـ 10) . ويمكن الا يقبل الليف أشعة على هذا المدى الموسَّع .

(2 ـ 4) ـ فتحة النفوذ العددية Numerical Aperture

يتمتع النظام البصري بميزة هامة وهي قابليته لتجميع الضوء الوارد ضمن مدى كبير من الزوايا . يبين الشكل (2 ـ 21) مستقبِلاً بصرياً مؤلفا من عدسة ومكشاف ضوئي . ان العدسة اكبر بكثير من سطح المكشاف فهي بذلك تعترض أشعة اكثر مما يفعله المكشاف ذاته . تبئِّر العدسة هذا الضوء على المكشاف . ويكوِّن كل من العدسة والمكشاف معاً نظام تجميع فعال . يسهل تحديد الموقع على المكشاف حيث يتبأَّر الضوء وذلك بتطبيق القانون (1) في رسم الشعاع . مدِّد ببساطة الشعاع الوارد الذي يمر في مركز العدسة حتى يلاقي المكشاف كما هو موضح في الشكل . وبتطبيق هذا القانون على الشكل (2 ـ 21) يبدو واضحا ان الاشعة الواردة ضمن زوايا كبيرة سوف لن تلاقي



شكل (2 ـ 21) ـ مستقبل بصري بمكشاف ضوئي موضوع في المستوى البؤري للعدسة . في (a) يرد الضوء موازيا لمحور العدسة وفي (b) تكون الاشعة الضوئية عند الزاوية القصوى للاستقبال (زاوية القبول) وفي (c) تكون الاشعة الواردة خارج حدود زاوية قبول النظام .

المكشاف وبالتالي ستضيع . بالاشارة الى الشكل تحدد زاوية القبول العظمى من العلاقة التالية :

$$\tan \Theta = \frac{d}{2f} \qquad (11\text{-}2)$$

حيث d: هو قطر سطح المكشاف الضوئي الدائري و f هو البعد البؤري للعدسة . وبسبب التناظر الدائري للمستقبل سيكشف المستقبل الضوء الوارد ضمن مخروط نصف زاويته Θ . تحدد فتحة النفوذ العددية (NA) كما يلي :

$$NA = n_0 \sin \Theta \qquad (12\text{-}2)$$

حيث n_o هو دليل الانكسار للمادة بين العدسة والمكشاف الضوئي و Θ هي زاوية القبول العظمى . ومن أجل المستقبل في الشكل (2 ـ 21) تعطى Θ بالمعادلة (2 ـ 11) .

مثال :

يبلغ البعد البؤري لمستقبل 10 cm وقطر مكشافه الضوئي 1 cm . اذا كان الهواء هو الفاصل بين العدسة والمكشاف احسب NA للمستقبل .

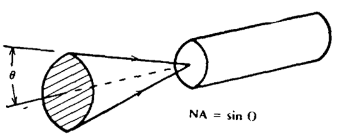
الحل :

حيث أن d/2f صغيرة جداً يمكننا استعمال تقريب الزاوية الصغيرة $\sin\Theta \approx \tan\Theta$. (يكون الخطأ أقل من 6٪ اذا كانت Θ أصغر من 20°) في هذه الحالة وباعتبار $n_o=1$ ينتج بحسب المعادلة (2 ـ 12) ما يلي :

$$NA = \sin \Theta = \frac{d}{2f} = 0.05$$

وهذا يوافق زاوية قبول $\Theta = 2.87°$ وتكون زاوية المخروط الكلية ضعفي هذه القيمة أي 5.74° .

ان تحديد فتحة النفوذ العددية المعطاة في المعادلة (2 ـ 12) ينطبق على جميع أنظمة تجميع الضوء بما فيها الالياف البصرية . يظهر على الشكل (2 ـ 22) مخروط التجميع من أجل ليف ما . ان الاشعة الضوئية التي ترد بزوايا

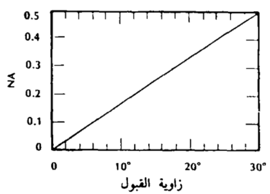


شكل (2 ـ 22) ـ يقبل الليف فقط أشعة ضوئية واردة ضمن مخروط له نصف زاوية Θ .

تقع خارج هذا المخروط لن تنتشر في الليف بل ستتخامد بسرعة . تقاس فتحة النفوذ العددية عادة بوجود الهواء أمام الليف فتكون $n_o=1$ في المعادلة (2 ـ 12) وتكون :

(13-2)

ويظهر على الشكل (2 ـ 23) رسماً بيانياً لهذه المعادلة . تشير قيمة صغيرة من NA إلى زاوية قبول صغيرة . وبسبب هذا يكون الاقتران مع ليف ذي NA منخفضة اكثر صعوبة (يكون التراصف الميكانيكي أكثر حساسية) وأقل كفاءة



شكل(2 ـ 23) فتحة نفوذ عددية وزاوية قبول NA = sin Θ .

(تكون بعض الاشعة خارج زاوية القبول) من الاقتران مع ليف ذي NA عالية . يمكن ان تستعمل العدسات (كما بينا سابقا) لتخفيض امتداد الحزمة ولتحسين كفاءة الارتباط نتيجة لذلك . ان الالياف المخصصة للاتصالات للمسافات الطويلة تكون قيم فتحات نفوذها عادة من 0.1 إلى 0.3 . أما الالياف من أجل المسافات الاقصر تكون قيم فتحات نفوذها أعلى بقليل (قيمة نموذجية من 0.4 إلى 0.5) .

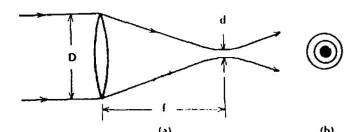
(2 ـ 5) ـ الانعراج (Diffraction)

في بعض التجارب تتنبأ البصريات الهندسية (نظرية الشعاع) بشكل صحيح بالنتائج العامة إلا أنها لاتتفق مع التفاصيل الدقيقة للمشاهدة . وحتى في تجارب أخرى يتم التنبؤ عن التصرف الاجمالي بشكل خاطىء . في هذه الامثلة يحتاج الامر الى نظرية اكثر اكتمالا مبنية على الطبيعة الموجية للضوء من أجل توضيح الظاهرة المشاهدة . تدعى هذه النظرية بصريات الانعراج أو البصريات الفيزيائية . يمكن ان نقول ان الانعراج هو الانحراف عن تنبؤات البصريات الهندسية . سنعرض في الفقرات التالية بعض الأمثلة الهامة التي تتطلب تحليلاً للانعراج .

يبين الشكل (2 ـ 6) عدسة تبئير حزمة ضوئية منتظمة في نقطة . تبين نظرية الانعراج وكذلك التجربة الدقيقة أن الحزمة لاتتقارب نحو نقطة الا أنها بدلا عن ذلك تصغّر الى بقعة مركزية من الضوء محاطة بحلقات ذات شدة متناقصة باستمرار . ويبلغ قطر البقعة المركزية :

$$d = \frac{2.44\ \lambda\ f}{D} \qquad (14\text{-}2)$$

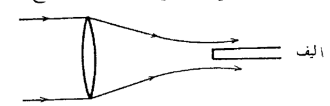
حيث λ هو طول الموجة و f هو البعد البـؤري و D هو قطر العدسة وهذا ما يبينه الشكل (2 ـ 24) . تكون البقعة المركزية عادة صغيرة الى حد ما . مثلا : اذا كان f=2D وكان طول الموجة 1 μm تعطي المعادلة (2 ـ 14) قطر بقعة يساوي 4.88 μm . قد يكون هذا مهملاً في بعض التطبيقات ويعني هذا أن معالجة البصريات الهندسية تكون كافية . ومن جهة أخرى افترض ان هذه الحزمة



شكل (2 ـ 24) ـ (a) ـ تبئير حزمة ضوء منتظمة بموجب نظرية الانعراج والتجربة . (b) ـ توزع الضوء في المستوى البؤري .

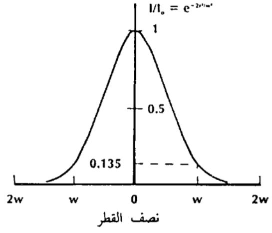
والعدسة تستعملان لاقتران الضوء الى ليف ذي قطر أقل من 4 μm (كما في الشكل 2 ـ 25) أو إلى غشاء زجاجي ذي ثخانة أقل من 4 μm . ستكون كفاءة الاقتران ضعيفة وذلك لان البقعة المركّزة تكون اكبر من الليف (أو الغشاء) ومن الواضح ان الامر يحتاج الى نظرية الانعراج لشرح نتائج هذه التجارب .

يسمى المستوى المتعامد مع اتجاه مسار الموجة المستوى العرضي . وغالبا ما تنتج منابع الضوء الفعلية حزماً غير منتظمة حيث تتغير الشدات عبر المستوى العرضي . يوجد نمط عرضي هام بشكل خاص وهو التوزع الغوسي . وهذا هو المنحنى الجرسي المألوف المبين في الشكل (2 ـ 26) . تشع وفق هذا النمط



شكل (2 ـ 25) . يمكن ان يؤدي تبئير حزمة على ليف صغير الى اقتران غير فعال .

معظم الليزات الغازية وبعض الثنائيات الليزية ذات التصميم الخاص . تتصف الالياف الصغيرة جدا (التي تبلغ اقطارها بضع ميكرونات) بتوزيع الضوء بهذه الطريقة أيضاً .



شكل (2 ـ 26) توزع الشدة الغوسي

يعطى توزع الشدة الغوسي رياضياً بالعلاقة التالية :

$$I = I_0 e^{-r^2/w^2} \qquad (15\text{-}2)$$

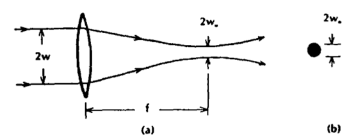
حيث e=2.718 هو أساس اللوغاريتم الطبيعي وبما أن $e^o = 1$ تكون I_o هي الشدة في مركز الحزمة (r=o) . وعندما ننظر الى هذا النمط بالعين فانه يبدو كما لو كان دائرة من الضوء حوافها غير حادة بل تتناقص شدة ضوئها تدريجيا . يقبل ان يحدد نصف قطر البقعة بالمسافة التي عندها تتناقص شدة الحزمة الى $1/e^2 = 0.135$ من قيمة الذروة لها I_o . ويسمى نصف القطر هذا حجم البقعة . يكون حجم البقعة للحزمة الموصوفة بالمعادلة (2 ـ 15) تماما w .

ان تبئير حزمة ضوئية غوسيّة بعدسة كما في الشكل (2 ـ 27) يعطي توزعاً من الضوء في المستوى البؤري بشكل غوسي أيضاً . ولا تظهر حلقات محيطية مثل تلك التي تظهر عندما تتبأر حزمة منتظمة . يبلغ حجم البقعة في المستوى البؤري ما يلي :

$$w_0 = \frac{\lambda f}{\pi w} \qquad (16\text{-}2)$$

ويكون توزع الشدة كما يلي : $I = I'_o \exp(-2r^2/w_o^2)$

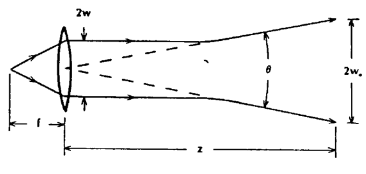
ولا يختلف حجم البقعة الغوسيّة المبأرة كثيراً عن حجم البقعة المركزية الحاصلة من تبئير حزمة منتظمة . يمكن ان ندرك هذا بكتابة المعادلة (2 ـ 16) بنفس شكل المعادلة (2 ـ 14) . نجري هذا بتحديد قطر البقعة المتمركزة $(d=2w_o)$ وقطـر بقعة الحزمة الواردة (D=2w) . وباجراء هذا التبديل في المعادلة



شكل (2 ـ 27) ـ (a) ـ تبئير حزمة ضوء غوسيّة و(b) ـ البقعة التي تظهر في المستوى البؤري .

(2 ـ 16) ينتج $d=4\lambda f/\pi D= 1.27\lambda f/D$ التي يمكن مقارنتها بالمعادلة (2 ـ 14) . نستنتج ان شكل الحزمة الواردة لا يغير كثيراً من درجة تركيز الضوء التي يمكن الحصول عليها .

سنرى ما هي التصحيحات التي يحتاج الامر ادخالها على نظرية الشعاع عندما تتوازى حزمة ما . بالإشارة الى الشكل (2 ـ 28) نرى منبعا ضوئيا صغيرا



شكل(2 ـ 28) ـ توازي حزمة غوسيّة

موضوعا عند النقطة البؤرية للعدسة. تتنبأ نظرية الشعاع انه سينبثق من العدسة حزمة متوازية من الضوء . فاذا كان توزع الضوء غوسيّاً تكون شدة الحزمة الواقعة على يمين العدسة وقريبا منها كما يلي : $I=I_o \exp(-2r^2/w^2)$ وتتفق نظرية الانعراج مع التنبؤات الهندسية للتوازي اذا حصرنا ملاحظتنا لمناطق قريبة من العدسة . ولمسافات أطول تبين نظرية الانعراج أن الحزمة تتباعد بزاوية كلية ثابتة تعطى بالعلاقة التالية :

$$\Theta = \frac{2\lambda}{\pi w} \qquad (17\text{-}2)$$

حيث تقدر Θ بالراديان . تؤكد التجارب هذه النتيجة ويكون النمط الحقلي المشّع : $I = I'_o \exp(-r^2/w_o^2)$ حيث: $w_o = \lambda z / \pi w$.

مثال :

اعتبر حزمة غوسية يبلغ حجم بقعتها 1 mm عندما تتوازى . ويبلغ طول الموجه 0.82 μm . احسب زاوية التباعد وأوجد أيضاً حجم البقعة عند 10 m و 1 km و 10 km .

الحل :

تساوي زاوية التباعد Θ ما يلي :

$\Theta = 2(0.82\times10^{-6}) / \pi (10^{-3}) = 0.55 \times10^{-3}$ راديان

أو $\Theta=0.032°$ ويكون حجم البقعة عند 10 m ما يلي :

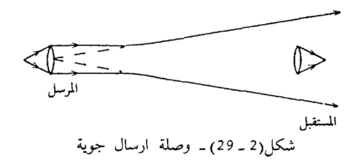
$w_o= (0.82\times10^{-6})10 / \pi(10^{-3}) = 2.6\times10^{-3}$ m= 2.6 mm

وعند 1 km يصبح حجم البقعة 260 mm وعند 10 km يصبح حجم البقعة 2.6 m .

يوضح المثال والمعادلات السابقة عدة نتائج مهمة . تبين المعادلة (2 ـ 17) انه يتم الحصول على زوايا تباعد صغيرة جداً عندما يكون حجم البقعة أكبر بكثير من طول الموجة . ان أطوال الموجات البصرية صغيرة لدرجة ان هذا الشرط يتحقق بسهولة . ان الشكل (2 ـ 28) هو المماثل البصري لهوائي ارسال تردد راديوي . في الحقيقة ان المعادلة (2 ـ 17) تنطبق كيفيا على هوائي يبلغ اعظم طول له بحدود 2w وعلى العموم ان تباعد حزمة مشعَّة بأي طول موجة يتناسب عكسياً مع حجم المشع مقيساً بأطوال الموجة . يبلغ طول المرسلات التي تبث حزما ضيقة عدة أطوال موجة . وعند الترددات الراديوية يجب ان يكون هذا الهوائي ضخما جدا . نستنتج ان الارسال البصري يقدم حزما ضيقة عالية التوجيه .

يبين الشكل (2 ـ 29) نظام اتصالات جوي . وبسبب التباعد على مسار طويل يمكن ان تكون الحزمة عند المستقبل كبيرة جدا وفي الحقيقة اكبر بكثير من عدسة الاستقبال ذاتها . وسيفقد في هذه الحالة الكثير من القدرة المرسلة . ومع ان الانظمة البصرية تؤدي عملها بشكل مقبول عند مسارات قصيرة فان الرغبة تبدو واضحة من أجل نقل القدرة بفاعلية أكبر في حال المسافات الطويلة . وقد عجلت هذه الضرورة البحث في الانظمة الموجهة مثل الليف البصري . ان اعتماد الخسارة على الطقس يطرح مشكلة أخرى من اجل الانظمة الجوية . وان ظروف الطقس السيء تضعف أداء النظام. قد يمكن التغلب على مشكلة الطقس

بارسال الحزمة في انبوب مفرغ . وسوف يكون هذا مقبولا اذا كانت الحزمة متوازية حقا. وحيث ان الامر ليس كذلك فان الحزمة المتسعة ستصطدم بجوانب الانبوب فيطرأ عليها خسارات بسبب الامتصاص والانتشار والانعكاس غير الكامل . وباستعمال الارقام الناتجة في المثال السابق سيحتاج



شكل(2 ـ 29) ـ وصلة ارسال جوية

انبوب طوله 1 km أن يكون نصف قطره اكبر من 260 mm لكي يحفظ الضوء من ملامسة جوانب الانبوب . ان انبوبا بهذه الضخامة ليس مقبولا البتة . بينما يعتبر الانبوب القصير (بضعة سنتمترات) عمليا من أجل حماية حزمة بصرية ضيقة مما يحيط بها وذلك لأن الحزمة سوف لن تتوسع كثيرا في حال المسارات القصيرة .

(2 ـ 6) ـ الخلاصة :

تتضمن هذه الخلاصة قائمتين : تذكّر الاولى بالنقاط الرئيسية التي تعلمناها من مناقشتنا المعروضة وتحتوي الأخرى مواضيع جديدة توحي بها هذه المناقشات.

أولا نعرض ما نعرفه :

1 ـ تنتشر الاشعة في وسط بسرعة يحددها دليل انكسار المادة n .

2 ـ تنحرف الاشعة بموجب قانون snell عندما تجتاز سطوحا فاصلة .

3 ـ يمكن للعدسات أن تبئّر وتوازي حزماً ضوئية . ويمكنها أن تكوِّن ايضا صورا مكبرة بتغيرات مرافقة في زوايا الشعاع .

4 ـ يمكن ان تؤدي العدسة القضيبية GRIN نفس وظائف العدسة الكروية التقليدية . ان بنيتها المتماسكة وبعدها البؤري الصغير يجعلانها جذابة من أجل الانظمة الليفية .

5 ـ تقبل الانظمة البصرية بما فيها الالياف الضوء فقط ضمن مدى محدود من زوايا الورود . وتكون فتحة النفوذ العددية مقياسا لهذه الخاصة.

6 ـ يخبرنا الانعراج بأنه لا يمكن للضوء ان يتمركز في نقطة متناهية في الصغر ولا يمكنه ان يتوازى بشكل كامل . فالاولى من هاتين النتيجتين تطبق عند إقران الضوء الى الالياف الصغيرة جدا بواسطة التبئير والثانية تطبق في بناء أنظمة الاتصالات البصرية غير الموجهة .

7 ـ يحدث غالبا توزع الشدة الغوسي في الانظمة الليزرية والليفية ويجب ان نألف هذا النمط .

8 ـ ان أنظمة الاتصالات البصرية الجوية عملية . ويمكن ان تفضل عن الانظمة الموجهة للمسارات القصيرة الخالية من الحواجز . أما من أجل المسارات الطويلة حيث لايمكن تركيب أدلّة موجهة (مثلا الاتصالات بين السواتل) فيمكن ان تكون قابلة للتطبيق .

وبصورة عامة ، على أي حال ، يوجد عدد أكبر لتطبيقات الانظمة الليفية مما هو للانظمة غير الموجهة . نعرض فيما يلي قائمة بالمواضيع الجديدة الواردة في الفصول التالية :

1 ـ خصائص انتشار الحزم الضوئية ضمن ليف بصري . تطبق السرعة المعطية في المعادلة (2 ـ 1) على سرعة الضوء في وسط غير مقيّد .

2 ـ الى أي مدى يَنفذ وينعكس الضوء عند حد فاصل .

3 ـ كيف تصمم نظاما عدسياً لتحقيق اقتران فعال من المنابع الى الالياف وبين الالياف . وكيف تحسب الكفاءات الناتجة .

4 ـ كيف تصمم بالعدسات القضيبية GRIN . وما هي الاجهزة الخاصة التي تستطيع ان تحتوي هذه العدسات بشكل مفيد .

5 ـ لماذا لاتقبل الالياف الاشعة عند كل الزوايا . وكيف تحسب فتحة النفوذ العددية لليف . وكيف تعتمد كفاءة الاقتران على NA .

ان هذه المواضيع هامة في تصميم وتقويم المكونات مثل القارنات والموصلات والمجمعات . ستساعدنا هذه المواضيع أيضاً في فهم كيف توجه الالياف الحزم الضوئية .

مسائل الفصل الثاني

2 ـ 1 ـ صَوِّر منبعاً نقطياً من الضوء بعدسة وحيدة ذات طول بؤري f . يشع المنبع النقطي ضمن مخروط زاويته α_0 . احسب انبساط الضوء الزاوي (α_i) عند الصورة بدلالة بعدي الجسم والصورة وكذلك انبساط الضوء الزاوي للمنبع . واحسب α_i إذا كانت $\alpha_0=40°$ والتكبير $M=5$.

2 ـ 2 ـ ارسم بيانياً فتحة النفوذ العددية مقابل زاوية القبول من أجل المدى $0 \leqslant NA \leqslant 0.7$. افترض ان دليل انكسار المادة المحيطة هو 1 .

2 ـ 3 ـ ارسم بيانياً التكبير مقابل البعد المقيَّس للجسم d_0/f .

2 ـ 4 ـ ليكن الطول البؤري لعدسة تصوير 20 mm . ارسم بيانياً بعد الجسم مقابل بعد الصورة .

2 ـ 5 ـ تُبأَّر حزمة متوازية منتظمة بواسطة عدسة ذات طول بؤري مقداره 20 mm وذات قطر مقداره 10 mm . احسب حجم البقعة المبأرة إذا كان طول الموجة $0.8\ \mu m$.

2 ـ 6 ـ يبلغ حجم البقعة لحزمة غوسيّة 1mm وطول موجتها $0.8\ \mu m$.
احسب حجم البقعة عندما تُبأر بواسطة عدسة ذات طول بؤري مقداره 20 mm .

2 ـ 7 ـ ارسم بيانياً الشدة المقيَّسة لحزمة غوسيّة مقابل البعد عن محور الحزمة إذا كان حجم البقعة 1 mm .

2 ـ 8 ـ احسب زاوية التباعد لحزمة غوسيّة ذات طول موجة مقداره $0.8\ \mu m$ وحجم بقعة مقداره 1 mm . إذا صُوِّبت هذه الحزمة نحو القمر فكم هو حجم بقعتها على سطح القمر ؟ وما هو حجم بقعتها عند مسافات 1 km و 10 km .

المراجع

الفصل الثاني

1. George Shortley and Dudley Williams. *Elements of Physics*. 5th ed. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc., 1971. p. 744.
2. Ibid. pp. 748-50.
3. Ibid. p. 778.
4. Teiji, Uchida, Moatoaki Furukawa, Ichiro Kitano, Ken Koizumi, and Hiroyoshi Matsumura. "Optical Characteristics of a Light-Focusing Fiber Guide and Its Applications." *IEEE J. Quantum Electron* 6, no. 10 (October 1970): 606-12.
5. Shortley. *Elements of Physics*. p. 778.
6. Jurgen R. Meyer-Arendt, *Introduction to Classical and Modern Optics*. Englewood Cliggs, N.J.: Prntice-Hall, Inc., 1972. pp. 136-37.
7. Shortley. *Elements of Physics*. p. 813.

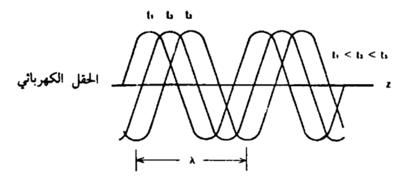
الفصل الثالث

أساسيات الموجة الضوئية
Light wave Fundamentals

ان انتشار الموجة هام في بصريات الليف . نعرض في هذا الفصل الجوانب القيمة وذات الاهمية الخاصة لمسير الموجة . لسبب ما تخيف النظرة العامة في دراسة الامواج الكهرمغناطيسية الناس الا ان المناقشة التالية هي بقدر الامكان مبسّطة حيث يتم شرح النتائج المهمة دون الخوض بالتفصيلات المطولة المطلوبة للتوصل اليها ويخفض استعمال الرياضيات الى الحد الادنى . ان المفاهيم المعروضة هي : السرعة والقدرة والاستقطاب والتداخل والانعكاسات عند حدود الفصل . وتتعلق كل هذه المواضيع ببصريات الليف مباشرة .

(3 ـ 1) ـ الامواج الكهرمغناطيسية Electomagnetic Waves

يتألف الضوء من حقل كهربائي وحقل مغناطيسي يتذبذبان بمعدلات عالية جدا من فئة 10^{14} Hertz ينتشر هذان الحقلان وفق النمط الموجي الموجّه بسرعات عالية جداً . يبين الشكل (3 ـ 1) صورة لموجة كهرمغناطيسية تنتشر على طول المحور z . يُرسم الحقل الكهربائي عند ثلاثة أزمنة مبيناً تقدم الموجه . عند اي موقع محدد يتغير اتساع الحقل وفق التردد البصري . ويعيد



شكل (3 ـ 1) ـ الحقل الكهربائي لموجة تنتشر في الاتجاه z . يُرسم الحقل عند ثلاثة أزمنة مختلفة كي تتضح حركة الموجة في اتجاه المسير .

الاتساع نفسه بعد دورة واحدة من التذبذب . يجب ان نلاحظ من الشكل ان الموجة تكرر نفسها في الفراغ بزمن ثابت بعد مسافة λ وهذه المسافة هي طول الموجة . ويسمى معكوسه $1/\lambda$ العدد الموجي .

يمكن التعبير عن الحقل الكهربائي للموجة المرسومة في الشكل (3 ـ 1) رياضياً كما يلي :

$$E = E_o \sin (\omega t - kz) \qquad (1\text{-}3)$$

حيث E_o هو اتساع الذروة و $\omega = 2\pi f$ راديان /ثانية و f هو التردد بالهرتز . يدعى العامل ω التردد الراديانى . يدعى الحد k عامل الانتشار ويعطى بالعلاقة :

$$k = \frac{\omega}{v} \qquad (2\text{-}3)$$

حيث v هي سرعة الموجة . يدعى العامل $(\omega t\text{-}kz)$ طور الموجه بينما kz هو انزياح الطور العائد لانتشار الموجة خلال طول z . نسمي موجه مستوية انها الموجة التي طورها هو ذاته على سطح مستوٍ . وفي المثال الحالي يكون الطور هو ذاته على أي مستوٍ معرّف بقيمة ثابتة لـ z ، هكذا فإن المعادلة (3 ـ 1) تمثل موجة

مستوية فإذا بقي الزمن ثابتاً تبين المعادلة (3 ـ 1) حينئذ التغير الفراغي الجيبي للحقل .

مثلا : اذا كانت $t=o$ تكون حينئذ $E=E_o sin (-kz)=-E_o sin kz$. ومن جهة أخرى اذا كان الموقع ثابتا عندئذ تبين المعادلة (3 ـ 1) التغير الزمني الجيبي للحقل . وبأخذ الموقع المثبت كأصل $(z=o)$ ينتج $E=E_o sin \omega t$ موضحا هذه النقطة . وباعتبار دليل الانكسار n تكون السرعة $v=c/n$ وهكذا تكون :

$$k = \frac{\omega n}{c} \qquad (3\text{-}3)$$

يسمى ثابت الانتشار في الفراغ الحر k_o . ومنه $n=1$ في الفراغ الحر .

$$k_o = \frac{\omega}{c} \qquad (4\text{-}3)$$

وبضم هاتين المعادلتين السابقتين يمكن ان يعطى ثابت الانتشار في أي وسط بدلالة قيمة ثابت الانتشار في الفراغ الحر كما يلي :

$$k = k_o n \qquad (5\text{-}3)$$

وبحسب العلاقة (1 ـ 3) $\lambda=v/f$ وبالتبديل في المعادلة (3 ـ 2) ينتج :

$$k = \frac{0.2\pi}{\lambda} \qquad (6\text{-}3)$$

تربط هذه المعادلة ثابت الانتشار في وسط ما بطول الموجة في ذلك الوسط . ان طول الموجة في الفراغ الحر هو $\lambda_o=c/f$ وطول الموجة في أي وسط هو $\lambda=v/f$ ومنه :

$$\frac{\lambda_o}{\lambda} = \frac{c}{v} = n \qquad (7\text{-}3)$$

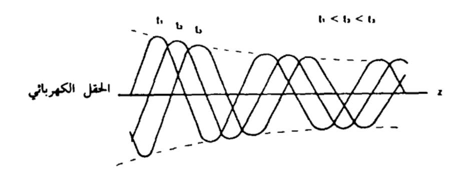
ان طول الموجة في وسط ما أقصر من طول الموجة في الفراغ الحر وذلك لان دليل الانكسار اكبر من الواحد .

تتناسب قدرة حزمة بصرية مع شدة الضوء (تعرّف كمربع الحقل الكهربائي) وتتناسب الشدة مع كثافة تدفق الاشعاع (السطوع irradiance) . ان وحدة قياس السطوع هي وات/م² (W/m^2) . لقد بحثنا في الفقرة (2 ـ 5) تغير شدة توزع ضوئي خاص وهو الحزمة الغوسيّة . تستعمل الشدة في بعض الاحيان للتعبير عن القدرة الكلية في موجة ما وهذا الاستعمال شائع بالرغم من عدم دقته .

اذا لم تفقد الموجة طاقة أثناء انتشارها تقدم حينئذ كل من المعادلة (3 ـ 1) والشكل (3 ـ 1) وصفا مناسبا لهذه الحالة . واذا كان التخميد مهماً يجب عندئذ تعديل كل من المعادلة والشكل فتصبح المعادلة المصححة :

$$E = E_o\, e^{-\alpha z} \sin(\omega t - kz) \qquad (8\text{-}3)$$

حيث لكل من ω و k نفس المعاني كما في المعادلة(3 ـ 1) . تحدد قيمة الحد α الذي هو معامل التخامد المعدل الذي به يضعف الحقل الكهربائي خلال الوسط المخمِّد . ومع ان التضاؤل أسيّ فانه بالنسبة للالياف عالية النوعية يكون معامل التخامد صغيراً لدرجة ان التخامد يكون ضعيفا (ربما بضعة dB) حتى من أجل مسارات طويلة . ويظهر الحقل كما يبينه الشكل (3 ـ 2) بالنسبة لوسط مخمِّد . ان الخط المقطع على الشكل هو منحنى العامل $\exp(-\alpha z)$ الذي يعبر عن الخسارة في المعادلة (3 ـ 8) .



شكل (3 ـ 2) ـ تخامد موجة منتشرة .

(3 ـ 2) ـ التشتت وتشوه النبضة ومعدل المعلومات
Dispertion, Pulse Distortion, and Information Rate

لقد افترضنا حتى هذه النقطة أن المنابع البصرية في الانظمة الليفية تبث ضوءاً بطول موجة وحيد (أي تردد وحيد) . ان هذا ليس بصحيح ابدا فالمنابع الحقيقية تنتج إشعاعا ضمن مدى من اطوال الموجة وهذا المدى هو عرض خط المنبع أو العرض الطيفي . وكلما كان عرض الخط أصغر كان المنبع اكثر تماسكا . يبث المنبع المتماسك بشكل كامل ضوءاً بطول موجة وحيد وهكذا يكون له عرض خط صفري وهو أحادي اللون تماما . يبين الجدول (3 ـ 1) قائمة بعروض خط نموذجية لمنابع شائعة . يعطى التحويل بين العرض الطيفي باطوال موجة $\Delta\lambda$ وبين عرض الحزمة بالتردد Δf كما يلي :

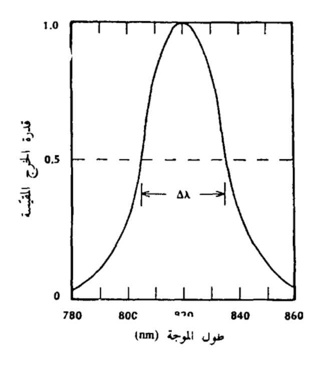
$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \qquad (9\text{-}3)$$

حيث f هو التردد المركزي و λ هو طول الموجه المركزي و Δf هو مدى الترددات المشعّة . ان هذا التحويل هو بكل بساطة التعبير الرياضي حيث يكون عرض البث الجزئي هو ذاته سواء حُسب على أساس توزع طول موجة أو توزع ترددي .

جدول (3 ـ 1) ـ عروض طيفية لمنبع نموذجي .

المنبع	عرض الخط $\Delta\lambda$
ثنائي باعث للضوء	20 - 100 nm
ثنائي ليزر	1 - 5 nm
ليزر Nd:YAG	0.1 nm
ليزر HeNe	0.002 nm

يوضح الشكل (3ـ3) بعض النقاط السابقة وهو رسم بياني لتوزع طول موجة لقدرة مشعَّة بواسطة LED نموذجي . يسمى محتوى الاشارة من طول الموجه او التردد بطيف الاشارة . من أجل الـ LED المبين في الشكل يكون طول الموجة المركزي (0.82 µm) 820 nm . ويؤخذ عادة عرض الخط بما يساوي العرض عند نقطتي نصف القدرة وهكذا في هذا المثال تكون :
(805-835 nm) Δλ=30 nm. ويكون عرض الحزمة الكسري 30/820=0.037 أو %3.7 .



شكل (3ـ 3) ـ
طيف ثنائي باعث للضوء .

تعتبر ثنائيات الليزر بموجب الجدول (3 ـ 1) اكثر تماسكا من ثنائيات الـ LED . حتى ان ليزرات انصاف النواقل نوع

Neodymium Yttrium- Aluminium- Garnet Laser (Nd : YAG)

و Helium- Neon gas laser (He Ne)

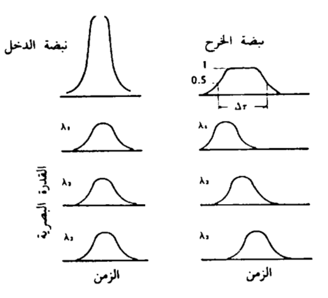
تكون أفضل . وعلى أي حال ان الحجم الصغير ومتطلبات القدرة المنخفضة لمنابع LD و LED تجعلها الافضل من الناحية العملية من اجل الانظمة الليفية على الرغم ان لها عرض خط اكبر بكثير من الباعثات الليزرية الأخرى .

ان السؤال الطبيعي الذي نطرحه الآن هو : هل نعتبر منبعا بعرض حزمة مهمل (أي ان نعامله كمنبع متماسك بشكل كامل) أو اننا نأخذ بعين الاعتبار النقص في تماسكه ؟ في المناقشة التالية سنتبين كيف أن العرض الطبيعي للمنبع يحد من سعة المعلومات لنظام ليفي وانه يمكن اهمال عدم التماسك اذا كانت سعة التحديد اكبر مما هو مطلوب .

تشتيت المادة وتشوه النبضة

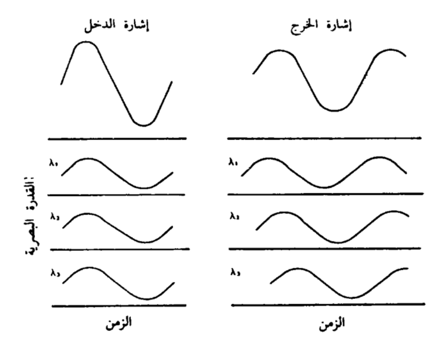
لقد ربطنا في الفقرة (2 ـ 1) سرعة الموجة v مع عامل الانكسار n بالمعادلة v=c/n . ومن أجل انواع الزجاج المستعمل في الالياف البصرية يتغير دليل الانكسار مع تغير طول الموجة . لذلك تتغير سرعة الموجة أيضاً مع تغير طولها . تطلق الكلمة ـ تشتيت ـ على خاصة تغير السرعة مع تغير طول الموجة . وكما في المثال الحالي عندما يكون تغير السرعة ناتجا عن خواص المادة تدعى النتيجة تشتيت المادة وبالنسبة للألياف وأدلة الموجة الأخرى يمكن ان يحدث التشتيت بواسطة البنى نفسها وهذه الحالة المعالجة في الفقرة (5 ـ 6) هي تشتيت دليل الموجة .

لنعتبر ماذا يحدث عندما يبث منبع حقيقي (عرض حزمة غير الصفر) نبضة ضوء في ليف زجاجي مشتت . تتألف النبضة البدائية من مجموعة من النبضات المتماثلة ما عدا في أطوال موجاتها وهذا ما يوضحه الشكل (3 ـ 4) من أجل بعض أطوال الموجة لمنبع . تنتشر النبضات المتعددة بسرعات مختلفة وتصل نهاية الليف بأوقات متفاوتة بشكل ضئيل . وعندما تجمع عند المخرج فانها تجمع مع بعض وتعطي خرجاً مطولاً أو منبسطاً بالنسبة لاشارة الدخل . يوضح هذا كيف يخلق التشتيت تشوه النبضة . وكلما ابتعد مسير النبضة كلما ازداد الانبساط .



شكل (3 ـ 4) ـ انبساط النبضة الذي يسببه الانتشار خلال وسط مشتت . تحتوي النبضة كاملة أطوال موجة λ_1 و λ_2 و λ_3 وكل واحدة منها تنتشر بسرعة مختلفة .

يؤدي التشتيت أيضا الى تشوه الاشارة التماثلية . يبين الشكل (3 ـ 5) موجة تماثلية منتشرة بثلاثة اطوال موجة مختلفة . وبعد انتشارها خلال الوسط



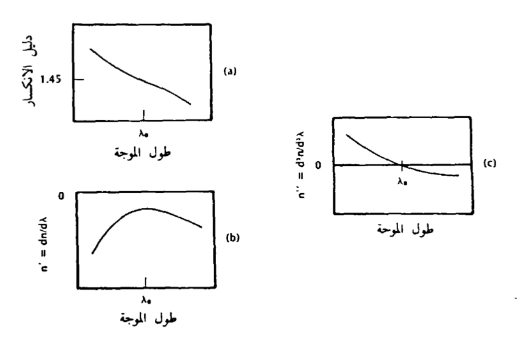
شكل (3 ـ 5) ـ يسبب التشتيت خسارة في اتساع اشارة تماثلية .

المشتت تضاف اطوال الموجة الثلاثة الى بعضها ويكون تغير اتساع الاشارة المستقبلة أقل من تغير اتساع اشارة الدخل . ان التشتيت لم يغير القدرة المتوسطة لترددات التعديل الا انه ينقص من تغير الاشارة . يحتوي هذا التغير المعلومات المرسلة لذلك يكون تخميده مزعجاً . يمكن أن نفكر بهذه النتيجة كتعريض لقمة الاشارة (تنقيص اتساعها) وتعبئة منخفضها (رفع سويته) . وسيؤدي التعريض الزائد الى نقص التغير في الاشارة تماما .

يمكن انقاص التشوه الذي يسببه تشتيت المادة (أو تشتيت دليل الموجة) باستعمال منابع ذات حزم أضيق أي باستعمال منابع اكثر تماسكا وبهذا الخصوص يتميز ثنائي الليزر عن ثنائي الـ LED . يمكن مبدئيا انقاص التشوه التشتيتي بترشيح الحزمة البصرية عند المرسل والمستقبل مما يسمح فقط لحزمة ضيقة جدا من أطوال الموجة ان تصل الى المكشاف الضوئي . تعاني هذه التقنية من عائقين : لايمكن بناء المراشيح بحزم تمرير ضيقة بما فيه الكفاية لكي تكون فعالة وستنقص المراشيح ذات الحزمة الضيقة بشكل كبير القدرة البصرية نتيجة ازالة الضوء عند اطوال الموجة غير المرغوبة .

يمكن ملاحظة التشتيت في الزجاج بسهولة فالجميع قد رأى نتائج التشتيت عندما يفصل موشور زجاجي الضوء الابيض الى الوانه الاساسية . توضح هذه التجربة بواسطة اعتماد دليل انكسار الزجاج على طول الموجة . وبموجب قانون Snell تنحرف الاشعة الضوئية الواردة (المعادلة 2 ـ 3) فتنحرف الالوان المختلفة بزوايا مختلفة وذلك لان دليل الانكسار يكون مختلفا من اجل كل لون . ان دليل الانكسار لزجاج ثاني أوكسيد السيليكون النقي (S_iO_2) المستعمل في الالياف البصرية ذو اعتمادية طول موجة مبينة في الشكل(3 ـ 6) . يوجد عدة خواص جديرة بالاهتمام وهي ان دليل الانكسار يتناقص بتزايد طول الموجة وهكذا يكون ميل المنحنى في الشكل (a-6-3) سالبا . ويتغير مقدار هذا الميل بتغير طول الموجة ، وعند طول موجة محدد (λ_0 في الشكل) يوجد نقطة انعطاف على منحنى دليل الانكسار . ويكون مقدار الميل بالقيمة الدنيا عند طول الموجة هذا كما يشير اليه الشكل (b-6-3) وبسبب هذا يكون ميل المنحنى (b) صفراً عند

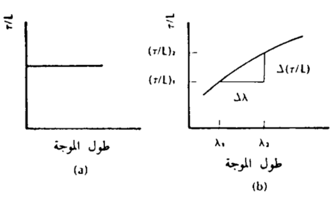
(λ_0) . يظهر ميل المنحنى (b) على الشكل (c-6-3) . ان الشكل الأخير هو المشتق الثاني لدليل الانكسار بالعلاقة مع طول الموجة . ان دليل الانكسار من اجل السيليكا النقية يقارب 1.45 وان نقطة الانعطاف تقع بقرب 1.3 μm . ان تطعيم الـ(S_iO_2) بكمية صغيرة من مواد أخرى مثل أوكسيد الجرمانيوم (G_eO_2) يؤدي الى ازاحة طفيفة لمنحنيات دليل الانكسار .



شكل(3 ـ 6) ـ (a) ـ اعتماد دليل الانكسار لزجاج (S_iO_2) على طول الموجة (b) ـ اشتقاق (ميل) المنحنى في الجزء (a).(c) ـ اشتقاق (ميل) المنحنى في الجزء(b) .

الآن وقد حددنا نوعياً كيف يشوه التشتيت الاشارات المرسلة خلال الزجاج يجب أن نجد مقدار زيادة العرض المحدثة وكيف يرتبط هذا بكمية المعلومات التي يمكن أن ننقلها .

ليكن τ الزمن اللازم من أجل أن تقطع نبضة مساراً طوله L . يبين الشكل (3 ـ 7) رسماً بيانياً لزمن الانتشار لكل واحدة طول (τ/L) كتابع لطول الموجة . لدينا في الشكل (a-7-3) منحنى من أجل وسط غير مشتت حيث لا يعتمد زمن الانتشار على طول الموجة . في الشكل (b-7-3) يعتمد زمن الانتشار على طول الموجة كما هو ملائم من اجل مادة مشتتة . لنعتبر الآن نبضة لها أقصر وأطول طولي موجة λ_1 ، λ_2 . وسنحدد انبساط هذه النبضة .



شكل (3 ـ 7) ـ زمن الانتشار لكل وحدة طول . (a) وسط غير مشتت و (b) وسط مشتت .

يمكن ان نعتبر ان طولي الموجة هما حافتي حزمة يبثها منبع ما . وبكلمات أخرى يمكن أن ندع $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$. حيث $\Delta\lambda$ هو العرض الطيفي للمنبع . ستصل جميع أطوال الموجة الواقعة بين λ_1 ، λ_2 بعد طول الموجة الاسرع من بين طولي الموجتين هاتين وقبل الأبطأ من بينهما . ان زمن الانتشار لكل واحدة طول لا يهمنا مباشرة . وان الكمية المهمة هي الفرق في زمن الانتشار لكل واحدة طول لكلا طولي الموجتين الحديتين . نشير الى هذه الكمية بالرمز $\Delta(\tau/L)$. عندئذ :

$$\Delta(\tau/L) = (\tau/L)_2 - (\tau/L)_1 \qquad (10\text{-}3)$$

حيث $(\tau/L)_1$ و $(\tau/L)_2$ هما القيمتان المطابقتان الى كل من λ_1 و λ_2 على التتالي . والحد $\Delta(\tau/L)$ هو انبساط النبضة لواحدة الطول وغالبا ما يدعى من اجل السهولة (ولكن من غير دقة) انبساط النبضة . ويدعى الحد $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$ انبساط النبضة الفعلي وبالطبع $\Delta\tau = L\Delta(\tau/L)$.

ليس للنبضات في الحالة الحقيقية بدايات ونهايات محددة بشكل واضح . إنها تزداد تدريجيا الى الذروة ومن ثم تتناقص بشكل مماثل كما يبينه الشكل (3 ـ 4) . تعتمد فترة دوام النبضة على تحديد نقاط انطلاقها وتوقفها . وقد استعملت تعاريف مختلفة واعتمدت كل واحدة على الزمن الذي تصل به النبضة الى سوية مرغوبة نسبة الى ذروتها . وسنستعمل التعريف التالي في هذا الكتاب : ان دوام النبضة هو الفترة بين الزمن الذي ترتفع عنده القدرة البصرية الى نصف قيمة ذروتها والزمن الذي تهبط عنده إلى نصف قيمة ذروتها . نسمي هذا التعريف ما يلي : عرض النبضة عند منتصف القيمة العظمى (FDHM) . وهذا ما يبينه الشكل (3 ـ 4) من أجل نبضة الخرج .

يبين الشكل (b-7-3) أن ميل المنحنى τ/L الذي يرمز له بالرمز $(\tau/L)'$ هو :

$$(\tau/L)' = \frac{\Delta(\tau/L)}{\Delta\lambda} \qquad (11\text{-}3)$$

أو :

$$\Delta(\tau/L) = (\tau/L)'\,\Delta\lambda \qquad (12\text{-}3)$$

وتبين التحليلات أن :

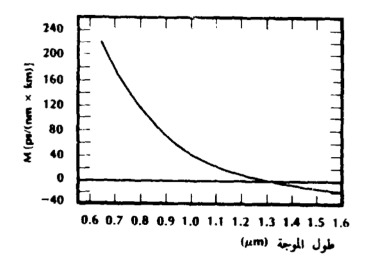
$$(\tau/L)' = -\frac{\lambda}{c}\,\frac{d^2n}{d\lambda^2} = -\frac{\lambda}{c}\,n'' \qquad (13\text{-}3)$$

يمكن ان نتصور هذا الحد بالنظر إلى الشكل (c-6-3) حيث يظهر مخطط n'' . وبضم المعادلتين الاخيرتين ينتج $\Delta(\tau/L) = -\lambda n''\,\Delta\lambda/c$. ويبين هذا مدى اعتماد انبساط النبضة على سلوك دليل الانكسار . من المناسب أن نعرّف تشتيت المادة كما يلي : $M = \lambda n''/c$. ويمكن حينئذ ان نكتب انبساط النبضة لكل واحدة طول كما يلي :

$$\Delta(\tau/L) = -\frac{\lambda}{c}\,n''\,\Delta\lambda = -M\,\Delta\lambda \qquad (14\text{-}3)$$

يبين الشكل (3 ـ 8) مخطط تشتيت المادة من أجل السيليكا النقية . يبدو ان رسم M مشابه تماماً الى الشكل (c-6-3) وذلك لان M تتناسب مع n'' . ان

وحدة قياس M هي ps/(nm×km) وتقرأ كمقدار انبساط النبضة بالبيكوثانية لكل نانومتر من العرض الطيفي للمنبع لكل كيلومتر من طول المسار . دعنا أيضا نفسر الاشارة السالبة في المعادلة (3 ـ 14) . حيث أن Δλ موجب دائما يبدو من هذه المعادلة ان انبساط النبضة يكون سالباً عندما تكون M موجبة . ويعني هذا أن : $(\tau/L)_1>(\tau/L)_2$ أي أن زمن المسير لأطوال الموجة الاقصر (λ_1) أطول من زمن المسير لأطوال الموجة الاطول (λ_2) . ان طول الموجة الاطول يعني انتشاراً أسرع وهذا ما يبينه الشكل (3 ـ 8) من أجل السيليكا النقية عند أطوال موجة تقع دون 1.3 μm حيث تكون M موجبة . اما عندما تكون M سالبة يكون انبساط النبضة موجبا وتنتشر الموجة ذات الطول الاقصر بشكل أسرع (يكون زمن مسيرها أقل) من الموجة ذات طول الموجة الاطول وهذه هي الحال من اجل السيليكا النقية عند أطوال موجة فوق 1.3 μm . من أجل بعض الحسابات يهمنا فقط مقدار انبساط النبضة ففي هذه الحالات سنتجاهل الاشارة في المعادلة (3 ـ 14) . وعندما نجمع فيما بعد بين تشتيت المادة وتشتيت دليل الموجة سنحتاج ان نأخذ بعين الاعتبار اشارة انبساط النبضة .



شكل (3 ـ 8)ـ تشتيت المادة للسيليكا النقية .

عند 1.3 μm يكون تشتيت المادة صفراً للسيلكا النقية . ويختفي انبساط النبضة الناتج عن تشتيت المادة عند طول الموجة هذا . ان الزجاجيات المستعملة

في بصريات الليف والتي أساسها السيليكا ذات تشتيت مادة معدوم (صفر) عند طول موجة بقرب 1.3 μm . ان التطعيم (وهو إضافة كميات صغيرة من مواد أخرى الى السيليكا) يمكن ان يغير طول الموجة ذات التشتيت الصفري بحوالي 0.1 μm

مثال :

أوجد مقدار انبساط النبضة في السيليكا النقية من أجل LED يعمل عند 0.82 μm وذي عرض طيفي مقداره 20 nm . يبلغ طول المسار 10 Km . كرر من أجل $\lambda = 1.5\ \mu m$ و $\Delta\lambda = 50$ nm

الحل :

يبين الشكل (3 ـ 8) أن M= 110 ps/(nm×km) . ومن المعادلة (3 ـ 14) لدينا :

$$\Delta(\tau/L) = 110(20) = 2200 \text{ ps/km} = 2.2 \text{ ns/km}$$

ويكون الانبساط 22 ns بعد مسافة 10 km . ان تغيير طول الموجة الى 1.5 μm ينتج تشتيت مادة مقداره 15 ps/(nm×km) وتؤدي المعادلة (3 ـ 14) حينئذ إلى $\Delta(\tau/L) = 750$ ps/km . ويكون الانبساط 7.5 ns بعد 10 km . يتناقص الانبساط بشكل كبير عند زيادة طول الموجة حتى في حال تزايد عرض حزمة المنبع

مثال :

كرر المثال السابق اذا كان المنبع ثنائي ليزر بعرض طيفي 1 nm

الحل :

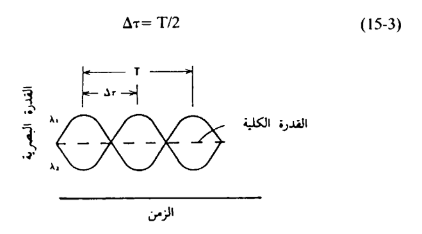
ان نقصان العرض الطيفي لمنبع بعامل محدد ينتج نقصاً مطابقاً في انبساط النبضة بذات القيمة بموجب المعادلة (3 ـ 14) . تكون انبساطات النبضة عند 10 km مساوية الى : 22/20= 1.1 ns عند 0.82 μm و 7.5/50= 0.15 ns عند 1.5 μm . ان استعمال منبع اكثر تماسكا ينقص الى حد كبير كمية تشتيت المادة .

معدل المعلومات Information Rate

يحد انبساط النبضة سعة المعلومات لاي نظام ارسال بالطريقة الموصوفة في الفقرات اللاحقة . سنستعمل من اجل الحسابات العددية الانبساط المتولد بواسطة تشتيت المادة . تطبق المعادلات المقدمة مهما يكن سبب التشوه وسنبحث المحددات على كل من الوصلات الرقمية والوصلات التماثلية . ومن غير استعمال الاشتقاقات المعقدة والطويلة لايمكننا الحصول على نتائج دقيقة . يمكن بسهولة ان نقدم حدوداً معقولة مبنية على تحاليل بديهية تقريبية . ستكون النتائج الحاصلة مفيدة في تصاميم الدرجة الأولى وستعمق فهمنا عن قدرة الوصلات الليفية في حمل المعلومات .

أولا لنعتبر حزمة ضوئية مشكّلة جيبياً (كالمبينة في الشكل 3 ـ 5) . ان تردد التعديل هو f والدور T= 1/f . افترض ان المنبع يشع أطوال موجة بصرية بين λ_1 و λ_2 . ما هو مقدار التأخير المقبول بين طولي الموجة الأسرع والأبطأ ؟ يبين الشكل (3 ـ 9) القدرة المستقبلة عند λ_1 و λ_2 عندما يكون التأخير مساوٍ الى نصف دور التعديل أي :

$$\Delta\tau = T/2 \qquad (15\text{-}3)$$



شكل (3 ـ 9) ـ الغاء التعديل عندما يكون لكل من طولي موجة الحامل تأخير مساوٍ الى نصف دور التعديل $\Delta\tau = T/2$

وبهذا المقدار من التأخير يلغى التعديل كليا عندما تجمع الموجتان . سيكون للقدرة المعدَّلة بأطوال موجة تقع بين λ_1 و λ_2 تأخيرات أصغر من T/2 وستلغى

جزئيا مما ينتج تغير اشارة صغير عند المستقبل . اذا اخذنا المعادلة (3 ـ 15) كانبساط نبضة مسموح أعظمي (بمعنى ان ذلك يتطلب أن يكون $\Delta\tau<T/2$) يتحدد تردد التعديل بالعلاقة :

$$f = \frac{1}{T} \leqslant \frac{1}{2\,\Delta\tau}$$

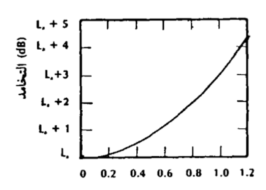
ان التردد الاعلى المحدد بهذا التعبير يثبت أنه تقريب جيد لعرض الحزمة عند 3 dB (وهو تردد التعديل الذي عنده تنقص قدرة الاشارة الى النصف) . ان الطريقة الاكثر تحليلية تنتج أن : $f= 1/(2.27\,\Delta\tau)= 0.44/\Delta\tau$. وتفترض هذه النتيجة خواص استجابة نبضية خاصة (غوسيّة) التي تقرّب سلوك الالياف الفعلية فيؤدي الى اختلاف صغير في التصميم الاولي للنظام وأي من هذه النتائج المتماثلة يستعمل . وفي أي حال يجب تضمين احتياط في عرض الحزمة من أجل تدارك الفرق بين استجابة الليف الفعلية والمفترضة . يصبح الآن عرض الحزمة البصرية عند 3 dB : $f_{3-dB} = (2\Delta\tau)^{-1}$ ويكون حد الطول الترددي :

$$f_{3\text{-}dB} \times L = \frac{1}{2\Delta\,(\tau/L)} \qquad (16\text{-}3)$$

يظهر على الشكل (3 ـ 10) تخامد وسط ارسال كتابع لتردد التعديل . تكون الخسارة الكلية بالديسيبل L_a+L_f حيث L_a هي الخسارة الثابتة (وتعود بشكل رئيسي الى الامتصاص والتناثر) و L_f هي الخسارة التي تعتمد على تردد التعديل (وتعود الى انبساط النبضة) . من أجل الاستجابة الغوسيّة يمكن اعطاء نموذج الى L_f كالتالي :

$$L_f = -10\log\{\exp[-0.693(f/f_{3-dB})^2]\} \qquad (17\text{-}3)$$

وتكون L_f مهملة من اجل $f << f_{3-dB}$.



شكل (3 ـ 10) ـ اعتماد الخسارة على تردد التعديل. La هي الخسارة الثابتة .

وكما تحدده هذه المعادلة تكون الخسارة 1.5 dB عند تردد مساوٍ إلى $0.71\ F_{3-dB}$ أي أن :

$$f_{1.5-dB} = 0.71\ f_{3-dB}$$

ان عرض النطاق البصري عند 1.5 dB مهم لانه كما هو مبرهن لاحقا في الفقرة (12 ـ 1) فهو يطابق التردد الذي عنده تنقص القدرة الكهربائية في المستقبِل بقيمة النصف . وهكذا فان عرض النطاق البصري 1.5 dB يساوي الى عرض النطاق الكهربائي 3 dB .

$$f_{1.5-dB}\ (\text{بصري}) = f_{3-dB}\ (\text{كهربائي}) = 0.71\ f_{3-dB}\ (\text{بصري}) \quad (18\text{-}3)$$

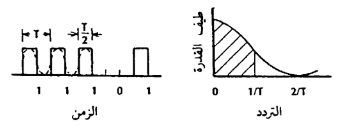
وحيث أن : $f_{3-dB}\ (\text{بصري}) = (2\ \Delta\tau)^{-1}$ نستنتج أن :

$$f_{3-dB}\ (\text{كهربائي}) = \frac{0.35}{\Delta\tau}$$

وأن :

$$f_{3-dB}\ (\text{كهربائي}) \times L = \frac{0.35}{\Delta(\tau/L)} \quad (19\text{-}5)$$

لنعتبر اشارة عودة الى الصفر رقمية (RZ) كما يبينه الشكل (3 ـ 11) . يحدد لكل بتةٍ موقع زمني T . ويكون معدل المعطيات R= 1/T bps . تشغل النبضات في هذه الصيغة نصف الشق الزمني وتكون مدة النبضة T/2. يظهر على الشكل طيف (المحتوى الترددي) هذه النبضات . ترسل اشارة RZ بشكل مناسب بواسطة نظام ذي عرض نطاق 1/T Hz وذلك لان معظم قدرة الاشارة يقع تحت هذا التردد . يمكن ان نصل الى نفس الاستنتاج بتقريب اشارة RZ بالمنحنى الجيبي . فنظام يمرر هذه الاشارة الجيبية سيرسل النبضات الفعلية بدون تشويه مفرط . وكما يبدو على الشكل (3 ـ 11) ان المنحنى الجيبي المقارب ذو التردد 1/T يحقق مطلب عرض النطاق .



شكل (3 ـ 11) ـ اشارة عودة الى الصفر وطيف القدرة لها . المنحنى ذو الخط المقطع هو المنحنى الجيبي المقارب . تشير المنطقة المهشرة الى عرض النطاق المطلوب للارسال .

حتى نكون متحفظين سنستعمل التردد 3 dB الكهربائي من أجل عرض نطاق النظام . وبتطبيق المعادلة (3 ـ 19) ينتج :

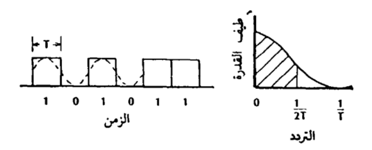
$$R_{RZ} = \frac{1}{T} = f_{3-dB}\ (\text{كهربائي}) = \frac{0.35}{\Delta\tau}$$

$$R_{RZ} \times L = \frac{0.35}{\Delta(\tau/L)} \qquad (20\text{-}3)$$

يمكننا أيضاً أن نحصل على هذه النتيجة الأخيرة بافتراض انبساط نبضي مسموح مساوٍ إلى 70٪ من مدة النبضة . حيث أن مدة نبضة RZ هو نصف دور التكرار فإن هذا الشرط يعطي : $\Delta\tau=0.7\ T/2=0.35\ T$ وتكون حينئذ

$R=1/T=0.35/\Delta\tau$ كما كان سابقاً . تكون النبضات المتجاورة منفصلة تماماً عن بعضها بتحقيق انبساط نبضي أقل من 35٪ من الشق الزمني . وعندما لا يتم هذا يمكن أن تنبسط اجزاء من النبضة في الشق الزمني المجاور مؤدية إلى حدوث تداخل بين الرموز فيزيد من احتمال أخطاء الكشف .

لنعتبر أخيراً إشارة عدم عودة للصفر رقمية (NRZ) كما يبينه الشكل (3 ـ 12) . ان الزمن المخصص لكل بتةٍ هو T وان معدل المعطيات هو 1/T .



شكل (3 ـ 12) ـ اشارة عدم عودة للصفر وطيف القدرة لها . المنحنى ذو الخط المتقطع هو المنحنى الجيبي المقارب . تشير المنطقة المهشرة إلى عرض النطاق المطلوب للارسال .

ويظهر على الشكل أيضاً طيف هذه الاشارة . إن عرض النطاق المطلوب للارسال هو 1/2T وهو مساوٍ إلى نصف ماهو مطلوب في نظام RZ . يكون ذلك بسبب أن نبضات NRZ أطول بمرتين من نبضات RZ وان عرض نطاق النبضة يتناسب عكسياً مع مدة النبضة . يظهر على الشكل منحنى جيبي يقارب اشارة NRZ ،من أجل حالة تناوب الواحدات والأصفار . ينتج هذا الوضع أسرع التغيرات وبالتالي أعلى الترددات . ان دور المنحنى المقارب 2T وتردده 1/2T يحقق مطلب عرض النطاق . نستنتج ان معدل المعطيات الاعظمي المسموح هو $R=1/T=2f$ حيث f هو عرض نطاق النظام . وباستعمال عرض النطاق الكهربائي 3 dB من المعادلة (3 ـ 19) ينتج :

$$R_{NRZ} = 2\ f_{3-dB}\ (\text{كهربائي}) = \frac{0.7}{\Delta\tau}$$

أو :

$$R_{NRZ} \times L = \frac{0.7}{\Delta (\tau/L)} \qquad (21\text{-}3)$$

إن انبساط النبضة المسموح به هو 70٪ من مدة النبضة T من أجل قطار نبضي NRZ .

مثال :

من أجل الشروط المذكورة في المثالين السابقين أحسب جداء (المعدل × الطول) و (التردد × الطول) .

الحل :

توجز انبساطات النبضة المأخوذة من المثالين السابقين في الجدول (3 ـ 2) . وتستعمل هذه المعطيات في المعادلات (3 ـ 16) و(3 ـ 19) و(3 ـ 20) و(3 ـ 21) من أجل تحصيل النتائج في الاعمدة الأخيرة من الجدول .

جدول (3 ـ 2) ـ أمثلة عن سعة المعلومات (محددة بتشتيت المادة في السيليكا)

المنبع				بصري		كهربائي	
	λ μm	$\Delta\lambda$ nm	$\Delta(\tau/L)$ ns/km	$f_{3-dB} \times L$	$R_{NRZ} \times L$ GHz × km	$f_{3-dB} \times L$ Gbps × km	$R_{RZ} \times L$ Gbps × km
LED	0.82	20	2.2	0.23	0.32	0.16	0.16
LED	1.5	50	0.75	0.67	0.94	0.47	0.47
LD	0.82	1	0.11	4.55	6.4	3.2	3.2
LD	1.5	1	0.015	33.33	46.7	23.3	.23.3

مثال :

ما هي حدود التردد والمعطيات من أجل وصلة 10 km من أجل المنابع المذكورة في الجدول (3 ـ 2) ؟

الحل :

بكل بساطة نقسم حاصل جداء كل من (التردد × الطول) و (المعدل×الطول) في الجدول على العدد 10 . نجد من أجل LED عند 0.82μm ما يلي :

$f_{3-dB} = 23$ MHz, $R_{NRZ} = 32$ Mbps

f_{3-dB} (كهربائي) $= 16$ MHz, $R_{RZ} = 16$ Mbps.

ومن أجل LED عند 1.5 μm ما يلي :

$f_{3-dB} = 67$ MHz, $R_{NRZ} = 94$ Mbps.

f_{3-dB} (كهربائي) $= 47$ MHz, $R_{RZ} = 47$ Mbps.

ومن أجل LD عند 0.82 μm ما يلي :

$f_{3-dB} = 455$ MHz, $R_{NRZ} = 637$ Mbps

f_{3-dB} (كهربائي) $= 320$ MHz , $R_{RZ} = 320$ Mbps

ومن أجل LD عند 1.5 μm ما يلي :

$f_{3-dB} = 3.3$ GHz , $R_{NRZ} = 4.7$ Gbps

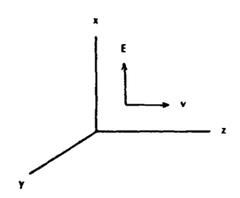
f_{3-dB} (كهربائي) $= 2.33$ GHz, $R_{RZ} = 2.33$ Gbps

ان النتائج المعروضة في الجدول (3 ـ 2) تبين بشكل مثير مميزات العمل بأطوال موجة أطول وتفوق ثنائيات الليزر LD على الثنائيات الباعثة للضوء LED من اجل معدّلات مُعطيات أعلى . ان الانظمة التي تستعمل ثنائيات ليزر في منطقة طول الموجة الطويلة تكون اكثر تعقيداً وكلفة من انظمة LED في مجال طول الموجة الاقصر (0.8-0.9 μm) ولذلك يكون استعمالها فقط حيث يحتاج الامر تحقيق أداء أعلى . ان المعدلات المجدْوَلة تكون الى حد ما عالية . وستكون أقل في بعض الانظمة بسبب انبساط نبضة إضافي ناتج عن التشوه الشكلي كما هو موصوف في الفقرة (5 ـ 6) .

تطبق حدود المعلومات الواردة في المعادلات (3 ـ 16) و (3 ـ 19) و (3 ـ 20) و (3 ـ 21) سواء أكان انبساط النبضة عائداً الى تشتيت المادة أو إلى أسباب أخرى . ان هذه النتائج تقريبيه بسبب الافتراضات الجارية في تبسيط الانظمة . انها على اي حال تعطي نتائج معقولة من أجل التصميم الأولي للنظام . وهي أيضا مهمة لانها تبين العلاقات بين انبساط النبضة وكل من معدلات المعطيات الرقمية المسموح بها وترددات التعديل التماثلي .

(3 ـ 3) ـ الاستقطاب Polarization

ان للحقل الكهربائي لحزمة ضوئية عدة اتجاهات مرافقة له . أحدها هو اتجاه المسير وقد تم مناقشته بالنسبة لانزياح الطور وطول الموجة والسرعة وتخامد الموجة المنتشرة . اما الاتجاه الآخر فهو الخاص بمتجه الحقل الكهربائي ذاته . يبين الشكل (3 ـ 13) العلاقة بين المتجه E واتجاه المسير من أجل موجة مستوية بسيطة . ترحل الموجة في الاتجاه z ، بينما يتوجه متجه الحقل الكهربائي في الاتجاه x . ان حقلا كهربائيا يتجه في اتجاه واحد فقط نقول عنه انه مستقطب خطيا وذلك لانه يتجه دائما على طول الخط الوحيد ذاته .



شكل (3 ـ 13) ـ موجة منتشرة في الاتجاه z ذات حقل كهربائي مستقطب في الاتجاه x.

يكون المتجه الكهربائي دائما متعامداً مع اتجاه المسير من اجل موجة مستوية في وسط غير محدّد . وبهذا فان الحقل في الشكل (3 ـ 13) يمكن ان

يتجه أيضا في الاتجاه y اثناء انتشاره في الاتجاه z . يتحدد الاتجاه الفعلي للاستقطاب بواسطة استقطاب المنبع الضوئي وبواسطة أية عناصر حساسة للاستقطاب تمر الحزمة من خلالها . من الممكن أيضا من أجل أي موجتين احداهما مستقطبة في الاتجاه x والثانية مستقطبة في الاتجاه y ان تنتشران سوية في الاتجاه z . ستكون هاتان الموجتان مستقلتين عن بعضهما البعض بسبب الاستقطاب المتعامد . يشير التعبير (اسلوب mode) الى الطرق المختلفة التي يمكن ان ترحل بها موجة في اتجاه معطى . ان الموجتين الموصوفتين هما اسلوبي موجة مستوية لوسَط غير محدود . قد يكون ممكنا أيضا وجود أساليب أخرى ذات استقطابات في المستوى xy على زاوية ما من المحورين xy . يمكن تحليل أي متجه حقل كهربائي إلى مكونتيه x و y وهكذا فان حقلاً كهذا هو ببساطة ضم الأسلوبين الموصوفين سابقاً .

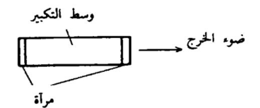
نقول عن موجة انها غير مستقطبة اذا كان متجهها الكهربائي يتغير عشوائيا في الاتجاه . إن الامواج في معظم الالياف البصرية غير مستقطبة .

في بنية موجَّهة مثل ليف بصري يمكن ان يوجد عدة أساليب والاستقطاب هو فقط واحد من الاختلافات بين الاساليب في دليل الموجة . ستبحث الاساليب في الفصلين القادمين وهي تلعب دوراً مهماً جداً للغاية في تحديد التصميم والامكانيات لنظام اتصالات بصري .

(3 ـ 4) ـ التجاويف الطنانة Resonant Cavities

يتألف مذبذب تردد راديوي من مكبر ودارة مـوالفـة وآليـة تغذيـة راجعة . تربط التغذية الراجعة خرج المكبر الى مدخله فتسبب تزايد الاشارة عندما تمر دوريا في المكبر . يتم الوصول الى الحالة المستقرة بعد وقت قصير من تغذية الدارة حيث تعوض خسارات النظام (القدرة المستخرجة من المذبذب كخرج مفيد اضافة إلى أي خسارات أخرى كتلك العائدة الى التسخين) بواسطة ربح المكبر . وبعد هذه النقطة يحافظ المذبذب على قدرة خرج ثابتة . ان تردد الاهتزاز تحدده دارة الطنين .

ان الليزر هو مذبذب ذو تردد مرتفع جدا . ويمكن ان يشار اليه تماما كمذبذب بصري . وتتمتع مركباته بوظائف توازي تلك الخاصة بمذبذبات الترددات الأخفض . يتألف الليزر المرسوم في الشكل (3 ـ 14) من وسط ذي شكل اسطواني له مرايا ملحقة عند كل نهاية فيعمل الوسط كمكبر حيث يكبر الضوء في هذه المادة بالآلية الموصوفة في الفصل (6) . تحدد خواص الوسط تردد الخرج والعرض الطيفي لليزر .

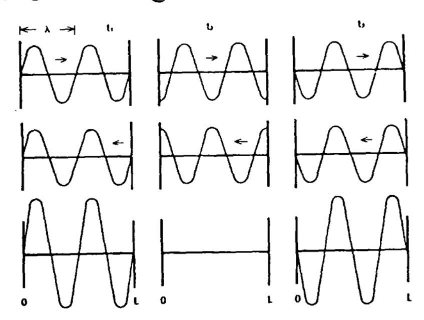


شكل (3 ـ 14) ـ يتألف الليزر من وسط تكبير ومرايا عند النهايتين

سنهتم في هذا الفصل أولاً بالغاية من المرايا . تؤمن المرايا تغذية راجعة للمذبذب الضوئي فتعكس الضوء ذهابا واياباً خلال الوسط المكبِّر . تُخرِجُ القدرة الليزر من خلال احدى المرايا المرسِلة جزئيا . في بعض الليزرات تكون كلا المرآتين مرسلتين مما يسمح بالحصول على القدرة من كلا نهايتي الجهاز . ان هذا التركيب قيِّم من اجل الثنائيات الليزرية في الأنظمة الليفية. وان الضوء الصادر من نهاية بث واحدة يقرن الى ليف الارسال ويقاس الضوء من الطرف الآخر من أجل مراقبة حالة المنبع . يحدد التراوح في قدرة المنبع بسرعة تعيد تصحيحات آلية في دارة القيادة الليزر الى سوية الخرج المطلوبة .

تشكل المرآتان في الشكل (3 ـ 14) تجويفا يوجد بداخله موجتان . واحدة تتحرك نحو اليمين وواحدة تتحرك نحو اليسار . ترسم هاتان الموجتان في أزمان مختلفة في الشكل (3 ـ 15) من أجل تجويف طوله L . تبين الاشكال العلوية الموجة المتحركة نحو اليمين وتبين الاشكال الوسطى الموجة المتحركة نحو اليسار . يكون الحقل الكلي في التجويف مساوٍ الى مجموع هاتين الموجتين

المتحركتين ويظهر على الشكل الاسفل في الازمنة المشار اليها . توضح هذه الرسومات الطرق التي يمكن ان تتداخل بها الامواج الكهرمغناطيسية الواحدة بالاخرى . وعندما يكون للامواج نفس الطور فانها تجمع الى بعضها جمعاً بناءً . وهذا هو الشرط عند الفترتين t_1 و t_3 على الشكل . ويكون الحقل الكلي اكبر من أي من مركبتيه . وعندما تكون الموجتان مختلفتين بفرق طور 180° الواحدة بالنسبة للاخرى كما يظهر عند الفترة t_2 فانه ينتج عن ذلك تداخل تخريبي .



شكل (3 ـ 15) ـ أمواج بصرية في تجويف طوله L عند فترات مختلفة : $t_3>t_2>t_1$. تمثل الأشكال العليا الموجة المتحركة نحو اليمين . في الأشكال الوسطي تتحرك الموجة نحو اليسار وفي الأشكال الأدنى تظهر الموجة الكلية .

ويكون الحقل الكلي صفراً عندما تتداخل موجتان متساويتا الاتساع ببعضهما تداخلاً تخريبياً وهذا هو مثال للسلوك شبه الموجي للضوء. إذا رسمنا الموجة الكلية من أجل جميع الفترات الزمنية على نفس الشكل نجد نمطاً متكرراً من الذروات والاصفار . ان هذا ينتج نمط الموجة المستقرة الساكنة المبين على الشكل (3 ـ 16) . عند نقاط خاصة يساوي الحقل دائما صفراً وعند النقاط أخرى يتذبذب الحقل ضمن الغلاف المرسوم في الشكل وان الغلاف ذاته يكون

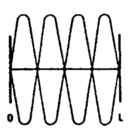
مستقراً . ان هذه هي نفس الظاهرة التي تحدث عندما ننقر خيطا مشدوداً مثبتا عند طرفيه . تشكل الاهتزازات نمط موجة مستقرة ذات ذروات وأصفار على طول الخيط .

ومن أجل ان ننتج نمط موجة مستقرة ساكنة يجب ان يكون طول التجويف مساوٍ الى عدد صحيح من نصف طول الموجة أي :

$$L = \frac{m\lambda}{2} \qquad (22\text{-}3)$$

حيث λ هو طول الموجة كما هو مقاس في المادة ضمن التجويف و m هو عدد صحيح موجب . ان الصورة في الشكل (3 ـ 15) قد رسمت من أجل تجويف طوله يساوي اثنين من طول الموجة كما يمكن ان نراه من تعداد دورتين كاملتين من الموجة على طول التجويف . وحيث أن L=2λ تكون عندئذ m=4 في المعادلة (3 ـ 22) . يمكن ان يوجد داخل التجويف في الحالة المستقرة فقط اطوال الامواج التي توافق المعادلة (3 ـ 22) . اما الامواج ذات الاطوال الاخرى المطروحة في التجويف فانها تتداخل تخريبيا الواحدة مع الأخرى أثناء مرورها ذهاباً واياباً بين المرآتين . وتتخامد هذه الامواج بسرعة كبيرة . نقول بان التجويف يكون طناناً عند أطوال موجة توافق المعادلة (3 ـ 22) وهي :

$$\lambda = \frac{2L}{m} \qquad (23\text{-}3)$$



شكل (3 ـ 16) ـ نموذج موجة مستقرة في تجويف ما .

يمكن استنتاج المعادلة (3 ـ 23) بادراكنا ان فرق الطور لموجة تتمم جولة تجويفية كاملة يجب ان يكون عدداً صحيحاً من أمثال 2π راديان اذا كان على النمط ان يكرر نفسه . من الفقرة (3 ـ 1) نرى ان فرق الطور هو kz حيث $k=2\pi/\lambda$ و z هو طول المسار . من أجل جولة كاملة يكون شرط الطنين حينئذ $k2L=m2\pi$ وهذا يقودنا مباشرة الى المعادلة (3 ـ 22) .

بموجب المعادلة (3 ـ 23) تكون التجاويف طنانة عند عدد من أطوال الموجة أو الترددات . تحسب ترددات الطنين بربط المعادلتين (3 ـ 23) و (3 ـ 1) بالعلاقة $v=c/n$ فتكون النتيجة :

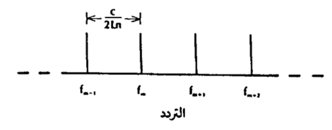
$$f = \frac{mc}{2nL} \tag{24-3}$$

حيث n هو دليل انكسار المادة ضمن التجويف . ان ترددات الطنين المختلفة المرسومة في الشكل (3 ـ 17) هي الاساليب الطولية للتجويف . ويكون الفاصل بين اسلوبين طوليين متجاورين للتجويف هو :

$$\Delta f_c = \frac{c}{2Ln} \tag{25-3}$$

سنحتاج الى القيمة المطابقة من انبساط طول الموجة في الفراغ الحر $\Delta\lambda_c$ وتحسب باستعمال العلاقة $\Delta f_c/f=\Delta\lambda_c/\lambda_0$ حيث λ_0 هي قيمة طول الموجة الوسطي في الفراغ الحر و f هو التردد الوسطي . وحيث ان $f=c/\lambda_0$ نجد :

$$\Delta\lambda_c = \frac{\lambda_0^2}{c}\,\Delta f_c \tag{26-3}$$



شكل (3 ـ 17) ـ ترددات الطنين لتجويف ما .

مثال :

احسب انبساط التردد وانبساط طول الموجة بين أساليب طولية من أجل تجويف مملوء برزنيخ غاليوم الومنيوم (Al Ga As) ذي طول 0.3 mm . ان هذه البنية نموذجية من أجل ثنائي ليزر Al Ga As الذي متوسط طول موجته (المركزي) يساوي 0.82 μm ودليل انكساره يساوي 3.6 .

الحل :

من المعادلة (3 ـ 25) يكون فراغ الأسلوب هو :

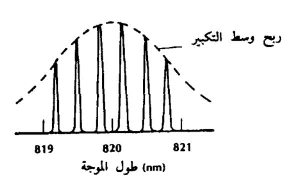
$$\Delta f_c = \frac{3 \times 10^8}{2(0.3\times10^{-3})\ (3.6)} = 139 \times 10^9 \text{ Hz}$$

ومن المعادلة (3 ـ 26) يكون انبساط طول الموجة هو :

$$\Delta\lambda_c = \frac{(0.82\times10^{-6})^2\ (139\times10^9)}{3 \times 10^8} = 3.11 \times 10^{-10} \text{ m}$$

$$= 0.311 \text{ nm.}$$

لقد ذكرنا سابقاً أن ثنائيات الليزر ذات عرض طيف يبلغ من 1 nm إلى 5 nm . لنفرض انه في المثال السابق كان العرض $\Delta\lambda$=2 nm . وهذا يعني أن للوسط Al Ga As تكبير كاف من أجل التذبذب الليزري بين 819 nm و 821 nm كما يشير إليه الشكل (3 ـ 18) . ان التجويف يسمح فقط بوجود الأمواج ضمن هذا المدى التي تكون فيه الأمواج طنانة . وحيث ان أمواج الطنين تبعد عن بعضها بمقدار 0.311 nm سيكون عدد أطوال الموجة المتميزة في الخرج : $\Delta\lambda/\lambda_c$=2/0.311≃6 . يبين الشكل (3 ـ 18) هذه الأساليب الطولية الستة . يمكن أن يكون عرض الأساليب الفردية مساوياً الصفر إذا كانت المرايا تعكس بشكل تام . وحيث انه ليس هذا هو الحال عملياً فان الأساليب في الشكل (3 ـ 18) قد رسمت موسَّعةً قليلاً . وحيث ان تشوه النبضة الذي يسببه تشتيت المادة يعتمد بشكل رئيسي على الانبساط بين أطول وأقصر موجة منبعثة من منبع



شكل (3 ـ 18) ـ القدرة عند الخرج لثنائي ليزري (الخط المتصل) . يظهر ستة أساليب طولية وعرض طيف إجمالي بقيمة تقريبية تساوي 2 nm .

فان التوزيع الدقيق للقدرة بين الأساليب الطولية ليس مهماً . وعلى أي حال إذا صمم الطنان بحيث انه يوجد أسلوب طولي واحد فقط فانه يتحقق انخفاض كبير في عرض نطاق خرج المنبع ويمكن الحصول على انبساط نبضة منخفض . يوجد طرق لانتاج ليزرات كهذه ذات أسلوب طولي وحيد . ان التعقيدات الإضافية لها تجعلها أكثر كلفة من ثنائيات الليزر متعددة الأساليب .

(3 ـ 5) ـ الانعكاس عند حد فاصل مستو

Reflection at a plane Boundary

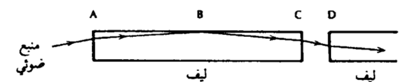
ان المسائل المتعلقة بكمية الضوء المنعكس عند حد فاصل بين عازلين تشكل جزءاً مهماً من دراسة وتطبيق البصريات . وهذه الأمور تكون حرجة على وجه الخصوص في تصميم وتحليل الأنظمة الليفية . تحدث السطوح العاكسة في الحالات الموضحة في الشكل (3 ـ 19) وهذه هي :

1 ـ الحد الفاصل بين هواء وزجاج حيث يقرن الضوء من المنبع إلى الليف .

2 ـ السطح البيني لنواة الليف وطبقته المحيطية .

3 ـ حدي الفصل هواء ـ زجاج حيث يوجد ثغرة هوائية بين الليفين المتصلين .

نرغب ان يكون الضوء المنعكس عند المدخل وعند ثغرة الموصل صغيراً وذلك لان هذه الانعكاسات تنقص القدرة المُرسلة . سنحتاج أن نضمِّن هذه الخسارات في حسابات مجموعة قدرة النظامِ كاملة . ومن جهة أخرى يجب ان يكون الانعكاس الداخلي عند حدود النواة (النقطة B في الشكل 3 ـ 19) كبيراً من أجل حفظ الضوء داخل الليف . سنحدد كميات الانعكاس في هذه الفقرة .



شكل (3 ـ 19) ـ سطوح عاكسة في نظام ليفي . تنعكس الأشعة الضوئية عند المدخل (A) وعند السطح البيني للنواة (B) وعند حدود الفصل لثغرة هواء مشكلة عند موصل أو وصلة دائمة (C أو D) .

ان أسهل الحسابات من أجل الخسارة الناتجة عن الانعكاس هي تلك التي من أجلها تنتشر الحزمة الواردة عمودياً على الحد الفاصل كما في الشكل (3 ـ 20) . ان عامل الانعكاس ρ هو نسبة الحقل الكهربائي المنعكس إلى الحقل الكهربائي الوارد . ومن أجل ورود عمودي يكون :

$$\rho = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \qquad (27\text{-}3)$$

n_1 n_2
موجة واردة
موجة نافذة
موجة منعكسة
حد فصل

شكل (3 ـ 20) ـ موجة واردة على حد فاصل مستوٍ بين عازلين (دليلي الانكسار n_1 و n_2) تنفذ جزئياً وتنعكس جزئياً .

حيث n_1 هو دليل الانكسار في منطقة الورود و n_2 هو دليل الانكسار في منطقة النفوذ . إذا كان $n_2 > n_1$ يصبح عامل الانعكاس سالباً . ويشير هذا إلى فرق طور مقداره 180° بين الحقلين الكهربائيين الوارد والمنعكس .

ـ ان الانعكاسية R هي نسبة شدة الحزمة المنعكسة إلى شدة الحزمة الواردة . حيث ان الشدة في حزمة ضوئية تتناسب مع مربع حقلها الكهربائي فان الانعكاسية تساوي مربع عامل الانعكاس ويكون :

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \qquad (28\text{-}3)$$

مثال :

من أجل سطح بيني من هواء إلى زجاج احسب الجزء من القدرة المنعكسة والنافذة . واحسب أيضاً خسارة الارسال بالديسيبل . استعمل دليل انكسار زجاج مساوٍ إلى 1.5 .

الحل :

من المعادلة (3 ـ 28) نجد :

$$R = \left(\frac{1 - 1.5}{1 + 1.5} \right)^2 = 0.04$$

وهكذا ينعكس 4٪ من الضوء . أما الباقي 96٪ فينفذ . تكون حينئذٍ خسارة الارسال بالديسيبل هي : $-10 \log_{10} 0.69 = 0.177$ dB

نقول بشكل تقريبي انه ستكون الخسارة بحدود 0.2 dB عندما يدخل الضوء من الهواء إلى الزجاج . وبسبب تناظر المعادلة (3 ـ 28) فانه ستحدث نفس الخسارة عندما يمر الضوء في الاتجاه المعاكس من الزجاج إلى الهواء .

لقد درسنا في الفصل 2 العلاقات بين زوايا الورود والانعكاس والنفوذ من أجل اتجاهات اختيارية للموجة الواردة . ويوضح الشكل (2 ـ 1) الموضوع . ومن أجل غايات مرجعية نحدد مستوى الورود بالمستوى المعين

بالعمود على سطح الفصل وباتجاه مسير الموجة الواردة . في الشكل (2 ـ 1) يكون مستوى الورود هو مستوى الشكل ذاته . يعتمد الجزء من الضوء المنعكس على زاوية الورود وعلى استقطاب الحقل الكهربائي بالنسبة إلى مستوى الورود . وقد لاحظنا سابقاً ان متجه الحقل الكهربائي يكون متعامداً مع اتجاه المسير . ويعتمد معامل الانعكاس على كون الحقل الكهربائي مستقطباً عمودياً على مستوى الورود أو موازياً له . ندعو الموجة العمودية باستقطاب s والموجة الموازية باستقطاب p . ويوضح الشكل (3 ـ 21) الحالتين . يمكن تحليل أي حقل وارد إلى مركبتيه s و p . إن معاملي الانعكاس لكل من حالتي p و s المعروفين كقانوني فرسنل Fresnel للانعكاس وهما :

استقطاب متوازي :

$$\rho_p = \frac{-n_2^2 \cos\Theta_1 + n_1 \sqrt{(n_2^2 - n_1^2 \sin^2\Theta_1)}}{n_2^2 \cos\Theta_1 + n_1 \sqrt{(n_2^2 - n_1^2 \sin^2\Theta_1)}} \qquad (29\text{-}3)$$

استقطاب متعامد :

$$\rho_s = \frac{n_1 \cos\Theta_1 - \sqrt{(n_2^2 - n_1^2 \sin^2\Theta_1)}}{n_1 \cos\Theta_1 + \sqrt{(n_2^2 - n_1^2 \sin^2\Theta_1)}} \qquad (30\text{-}3)$$

استقطاب متعامد   استقطاب متوازي

شكل (3 ـ 21) ـ يقسم الانعكاس عند سطح فصل إلى الاستقطابين المبينين . تمثل الدوائر متجهات تتجه إلى الورقة .

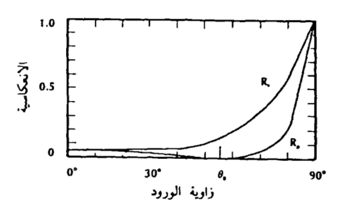
مع أن هاتين المعادلتين تبدوان مخيفتين إلى حد ما إلا انه يمكن ايجاد قيمتيهما بسهولة عندما يعرف كل من دليلي الانكسار وزاوية الورود والاستقطاب . لا يمكن الإقلال من أهمية المعادلتين (3 ـ 29) و(3 ـ 30) حيث انهما تتنبآن عن الظاهرة التي بواسطتها توجه الألياف العازلة الضوء .

يتم ايجاد الانعكاسية بتربيع مقادير معاملات الانعكاس أي أن: $R=|\rho|^2$. وتظهر النتائج على الشكل (3 ـ 22) من أجل سطح بيني من هواء إلى زجاج وعلى الشكل (3 ـ 23) من أجل سطح بيني من زجاج إلى هواء . تظهر الخصائص العامة المبينة على الشكلين عندما تكون هناك انعكاسات بين أي عازلين . يمكن ملاحظة بعض المعالم الهامة وربما غير المتوقعة ، ثلاثة من بين هذه المعالم هي :

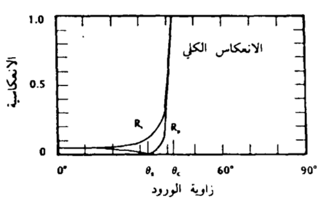
1 ـ لا تتغير الانعكاسية بمقدار مهم من أجل زوايا ورود قريبة من الصفر . فمن أجل سطح بيني هواء ـ زجاج تعتبر قيمة انعكاسية مقدارها 4٪ محسوبة من أجل ورود عمودي تقريباً جيداً من أجل زوايا تصل حتى 20° .

2 ـ ان مقدار انعكاسية يساوي صفراً يعني نفاذاً كاملاً من أجل زوايا ورود وحالات استقطاب محددة .

3 ـ ان مقدار انعكاسية يساوي واحداً يشير إلى انعكاس كامل من أجل مدى ما من زوايا الورود .



شكل (3 ـ 22) ـ الانعكاسية عند سطح بيني من هواء إلى زجاج .
$n_1=1$ و $n_2=1.5$

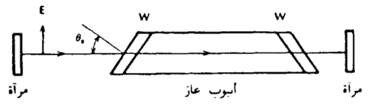


شكل (3 ـ 23) ـ الانعكاسية عند سطح بيني من زجاج إلى هواء
$n_2=1$ و $n_1=1.5$

لنعتبر أولاً حالة انعكاسية تساوي صفراً . يبين الشكلان (3 ـ 22) و (3 ـ 23) انها تحدث فقط من أجل الاستقطاب المتوازي . ان معامل الانعكاس ρ_p (ومنه الانعكاسية $|\rho_p|^2$) ستكون صفراً عندما تساوي المعادلة (3 ـ 29) صفراً . ويحدث هذا عند زاوية ورود Θ_B تدعى زاوية بروستر Brewster تحقق المعادلة التالية :

$$\tan \Theta_B = \frac{n_2}{n_1} \qquad (31\text{-}3)$$

لا يوجد زاوية ورود يمكن ان تجعل ρ_s في المعادلة (3 ـ 30) صفراً . تفيد زاوية بروستر (Brewster) من أجل ارسال حزمة ضوئية إلى (أو من) وسط عازل من غير خسارات انعكاس . يظهر في الشكل (3 ـ 24) تطبيقاً خاصاً حيث يوضع عند زاوية بروستر نوافذ زجاجية موجودة عند نهايتي أنبوب ليزري غازي



شكل (3 ـ 24) ـ نافذة W محددة بزاوية بروستر (Brewster) ، عند نهايتي أنبوب ليزري غازي هيليوم ـ نيون .

هليوم ـ نيون . ستمر الحزمة الضوئية المستقطبة في المستوى المتوازي ذهاباً وإياباً بين المرايا من غير خسارات انعكاس عند النوافذ .

مثال :

أوجد زاوية بروستر من أجل سطوح بينية من هواء إلى زجاج ومن زجاج إلى هواء .

الحل :

باستعمال المعادلة (3 ـ 31) من هواء إلى زجاج يكون : $\tan \Theta_B=1.5$ فتكون $\Theta_B=56.3°$. ومن أجل زجاج إلى هواء تكون $\tan \Theta_B=(1.5)^{-1}$ أي أن : $\Theta_B=33.7°$.

بالرجوع الآن إلى الشكل (3 ـ 19) نجد خسارة انعكاس مقدارها 0.2 dB عند مدخل الليف . في الفصل الثامن حيث نغطي موضوع اقتران المنبع بشكل أشمل سنجد خسارات إضافية (أكثر بكثير) . يوجد خسارة 0.2 dB عند كل من السطحين البينيين للوصلة بين ليف وليف . تكون خسارة الانعكاس الكلي 0.4 dB . وستظهر في الفصل الثامن أيضاً تحليلات أكثر عن هذا الموصل . لدينا عند السطح البيني بين نواة الليف وطبقته المحيطة انعكاس كلي . ان الانعكاس الكلي مهم جداً حيث سنخصص من أجل ذلك الفقرة التالية كاملة .

ان التحاليل المقدمة آنفاً صحيحة إذا كان سطح حد الفصل أملساً . تكون الانعكاسات من سطح صقيل برّاقة وتحدث عندما تكون انحرافات السطح عن الاستوائية صغيرة بالمقارنة مع طول موجة الضوء الوارد . إذا كان السطح خشناً فان الضوء الوارد يتناثر على مدى واسع من الاتجاهات . وهذا هو الانعكاس المنثور . لا تخضع الانعكاسات المتناثرة لقانون سنِل Snell للانحراف أو لقوانين فرسنل Fresnell للانعكاس .

(3 ـ 6) ـ انعكاسات الزاوية الحرجة Critical-angle Reflections

كما هو مرسوم في الشكل (3 ـ 23) يوجد انعكاس كلي من أجل زوايا ورود أكبر من قيمة خاصة ويرمز لها بـ Θ_C وتدعى Θ_C الزاوية الحرجة. ويمكن تحديدها بسهولة من المعادلتين (3 ـ 29) و (3 ـ 30) بملاحظة أن $\rho_P = 1$ وأن $\rho_S = 1$ عندما تكون $n_2^2 - n_1^2 \sin \Theta i = 0$. ان الزاوية التي تحقق هذه المعادلة هي الزاوية الحرجة وهكذا يكون :

$$\sin \Theta_c = \frac{n_2}{n_1} \qquad (32\text{-}3)$$

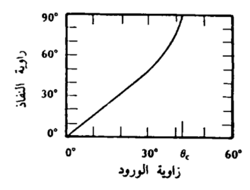
وحيث أن جيب زاوية لا يبلغ أبداً قيمة أكبر من واحد يبدو واضحاً من هذه النتيجة إن انعكاسات الزاوية الحرجة تحدث فقط عندما $n_1 > n_2$ أي عندما تمر الموجة من منطقة ذات دليل انكسار أعلى إلى منطقة ذات دليل انكسار أدنى . وهذا ما يفسر حدوث الزاوية الحرجة في الشكل (3 ـ 23) (حالة حد فاصل من زجاج إلى هواء) لكن ليس في الشكل (3 ـ 22) (حالة حد فاصل من هواء إلى زجاج) . يجب أن ندرك ان المعادلة (3 ـ 32) لا تعتمد على استقطاب الموجة وهي حقيقية من أجل كل من الاتجاهين العمودي والمتوازي لمتجه الحقل الكهربائي .

من أجل زوايا أكبر من الزاوية الحرجة سيكون $\sin \Theta i$ أكبر من $\sin \Theta_c$ وهكذا فإن $n_1^2 \sin^2 \Theta i > n_2^2$ وستكون العوامل تحت إشارة الجذر التربيعي في المعادلتين (3 ـ 29) و (3 ـ 30) سالبة الآن . وحيث ان الجذر التربيعي لعدد سالب يكون تخيلياً فإن كلاً من ρ_p و ρ_s يأخذ الشكل التالي :

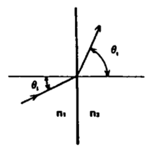
$$|\rho| = \frac{|A - jB|}{|A + jB|}$$

حيث A و B اعداد حقيقية و j تشير الى تعبير تخيلي . وحيث أن مقادير كل من $(A - jB)$ و $(A + jB)$ هي $\sqrt{A^2 + B^2}$ فإن مقدار ρ يكون واحداً . ان الانعكاسية $R = |\rho|^2$ تساوي حينئذ واحداً لجميع الزوايا التي تحقق $\Theta i \geqslant \Theta_c$.

هناك تطوير بديل ومرشد عن الانكعاس الكلي ويشمل قانون سنِل . سنعتبر حداً فاصلاً من زجاج الى هواء وسنجد زاوية النفاذ من أجل جميع زوايا الورود من المعادلة (2 ـ 3) : $\sin \Theta_t = (n_1/n_2) \sin \Theta i$.يظهر النتيجة مرسومة في الشكل (3 ـ 25) . وكما يبدو على الشكل تزداد زاوية النفاذ بأسرع من زاوية الورود وتصل إلى 90° عندما: $\sin\Theta_i = n_2/n_1$ وهذا هو بشكل دقيق شرط الزاوية الحرجة وفقاً للمعادلة (3 ـ 32) . بالاشارة الى الشكل (3 ـ 26) يبدو واضحاً معنى زاوية نفاذ 90°فلن تستمر الموجة النافذة بالانتشار في الوسط الثاني . نستنتج بأن كل الضوء يجب أن ينعكس راجعاً إلى الوسط الأول . يسمى الانعكاس التام عند حد فصل عازل/عازل الانعكاس الداخلي الكلي .



شكل (3 ـ 25) ـ زاوية نفاذ من أجل سطح بيني من زجاج الى هواء . $n_1=1.5, n_2=1$



شكل (3 ـ 26) ـ عند تزايد Θ_i تقترب Θ_t من 90°اذا كان $n_1>n_2$

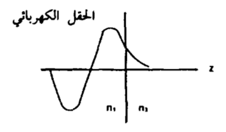
يورد الجدول (3 ـ 3) الزوايا الحرجة محسوبة من المعادلة (2 ـ 32) لعدة مجموعات من المواد. ان حد الفصل بلاستيك/بلاستيك الوارد في الجدول هو نموذجي من أجل ليف بلاستيكي كلياً . حيث تملك كل من نواته وكسائه

المحيطي أدلّة انكسار مختلفة . وان التعبير زجاج ـ بلاستيك يعني ليفاً بنواة زجاجية محاطة ببلاستيك . وأن حد فصل زجاج ـ زجاج هو أمر نموذجي من أجل ليف زجاجي كلياً الذي تكون فيه النواة والكساء من مركبات مختلفة قليلاً وتكون بالتالي ذات أدلّة انكسار مختلفة قليلاً . توجه هذه الألياف الضوء بأن تعكس كلياً الأشعة التي تصدم حدود الفصل لها . وعلى أي حال يجب أن تكون الأشعة عند أو بعد الزاوية الحرجة من أجل أن توجه من غير خسارة .

جدول (3ـ3) ـ زوايا حرجة

حد الفصل	n_1'	n_2	Θ_c
زجاج ـ هواء	1.5	1	41.8°
بلاستيك ـ بلاستيك	1.49	1.39	68.9°
زجاج ـ بلاستيك	1.46	1.4	73.5°
زجاج ـ زجاج	1.48	1.46	80.6°

ان التداخل بين الأمواج الواردة والأمواج المنعكسة يخلق موجة مستقرة في منطقة الورود كما يصوره الشكل (3 ـ 27) . ومع أن القدرة تنعكس كلها فلا يزال يوجد حقل في الوسط الثاني . ويتناقص اتساع هذا الحقل مع زيادة البعد عن الحد الفاصل كما يظهر على الشكل . ان هذه النتيجة ليست متناقضة مع الانعكاس الكلي وذلك لأنه لا تنتشر أي قدرة بعيداً عن الحد الفاصل إلى الوسط الثاني . إن مثل هذا الحقل الذي يتضاءل ولا يحمل أي قدرة يطلق عليه الحقل



شكل (3 ـ 27) ـ موجة مستقرة وموجة مضمحلة تخرج عند الجوانب المقابلة لحد فاصل عاكس كلياً .

المضمحل . ان الحقل الكهربائي المضمحل يتخامد أسياً بحسب التعبير $e^{-\propto z}$ حيث يأخذ عامل التخامد $\propto$ القيمة التالية :

$$\propto = k_o \sqrt{(n_1^2 \sin^2 \Theta_i - n_2^2)} \qquad (33\text{-}3)$$

و k_o هو عامل الانتشار في الوسط الحر . عند الزاوية الحرجة تكون $\Theta i = n_2/n_1$ فتصبح $\propto = 0$ ولا يكون هناك تخامد للحقل . وعندما تزداد Θ_i وتتجاوز Θ_c تزداد قيمة $\propto$ وتتخامد الحقول بسرعة أكبر . يمكن الآن أن نذكر النتيجة المهمة التالية : ان الأشعة الواردة عند زوايا أكبر لكن قريبة من الزاوية الحرجة تنتج أمواجاً مضمحلة تتخامد ببطء وتخترق بعمق الوسط الثاني بينما تنتج الأشعة التي ترد بعد الزاوية الحرجة بكثير أمواجاً تختفي بعد اختراق قصير فقط في الوسط الثاني .

إن معامل الانعكاس المحسوب من المعادلة (3 ـ 29) أو من المعادلة (3 ـ 30) هو كمية عقدية ذات مقدار وزاوية عندما $\Theta_i > \Theta_c$. وقد بينا ان المقدار يساوي واحدا . تمثل الزاوية انزياح الطور للموجة المنعكسة بالنسبة الى الموجة الواردة وتختلف قيمتها مع زاوية الورود .

(3 ـ 7) ـ الخلاصة :

تركّز هذا الفصل على تطوير الأفكار الأساسية عن الأمواج الضوئية التي تطبق مباشرة على بصريات الليف . إن مفاهيم الموجة في الاتساع والطور وطول الموجة والاستقطاب يجب أن يكون لها معنى بالنسبة إليك . وقد دُرس بشكل موسع تشوه النبضة العائد لتشتيت المادة بسبب تأثيره على سعة الألياف في التعامل مع المعلومات .

سنعتبر في الفصل 5 أسباباً أخرى في تشوه النبضة . ان اعتماد معدل المعلومات على العرض الطيفي للمنبع البصري يشير إلى أهمية هذه الخاصة للباعث الضوئي . وقد درس موضوع طنين التجويف وذلك لأنه يحدد بنية الاسلوب الطولي الذي يظهر في طيف الخرج لثنائي ليزر . وكما سنرى في الفصل التالي يوضح الطنين أيضاً بنية الأسلوب في دليل موجةٍ عازلٍ . تلعب

الانعكاسات عند حدود فصل للعازل دوراً رئيسياً في بصريات الليف . ويمكن للانعكاس الداخلي الكلي ان يمكّن العوازل من تشكيل أدلّة موجة لأشعة ضوئية .

من أجل أن نقدم مرجعاً مناسباً أوجزنا بعضاً من أهم نتائج هذا الفصل :

1 ـ انبساط النبضة من أجل تشتيت المادة :

$$\Delta (\tau/L) = - M \Delta\lambda \qquad (14\text{-}3)$$

2 ـ جداء الطول في عرض النطاق البصري 3 dB :

$$f_{3-dB} \times L = \frac{1}{2 \Delta (\tau/L)} \qquad (16\text{-}3)$$

3 ـ جداء الطول في عرض النطاق الكهربائي 3 dB :

$$f_{3-dB} = \frac{0.35}{\Delta(\tau/L)} \qquad (19\text{-}3)$$

4 ـ جداء الطول في المعدل ، RZ :

$$R_{RZ} \times L = \frac{0.35}{\Delta(\tau/L)} \qquad (20\text{-}3)$$

5 ـ جداء الطول في المعدل ، NRZ :

$$R_{NRZ} \times L = \frac{0.7}{\Delta(\tau/L)} \qquad (21\text{-}3)$$

6 ـ فاصل الاسلوب الطولي :

$$\Delta f_c = \frac{c}{2Ln} \qquad (25\text{-}3)$$

7 ـ الانعكاسية من أجل ورود عمودي :

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \qquad (28\text{-}3)$$

8 ـ الزاوية الحرجة من أجل انعكاس كلي :

$$\sin \Theta_C = \frac{n_2}{n_1} \qquad (32\text{-}3)$$

مسائل الفصل الثالث

3 ـ 1 ـ اعتبر نبضة منبعثة عند طولي موجة بصرية منفصلين . هل تصل النبضة ذات الموجة الأطول ، في السيليكا النقية ، إلى المستقبِل أولاً أم تصل إليه الموجة الأقصر أولاً ؟

3 ـ 2 ـ احسب ، من أجل السيليكا ، انبساط النبضة لوحدة الطول إذا كان طول موجة المنبع : $\lambda=0.85\ \mu m$ والعرض الطيفي 30 mm . كرر الحساب من أجل عرض طيفي مقداره 2 nm .

3 ـ 3 ـ كرر المسألة (3 ـ 2) من أجل طول موجة منبع مقداره $1.55\ \mu m$. افترض ان تشتيت المادة هو : $M=-20\ ps/(nm\times km)$.

3 ـ 4 ـ استعمل نتائج المسألتين (3 ـ 2) و(3 ـ 3) لكي تحسب معدلات المعطيات العظمى وترددات التعديل من أجل 100 m و 1 km و 10 km لترميزي RZ و NRZ .

3 ـ 5ـ احسب ثابت الانتشار في الهواء وفي الزجاج إذا كان طول الموجة في الفراغ الحر $0.82\ \mu m$.

3 ـ 6 ـ احسب عرض النطاق الجزئي بالهرتز لمنبع $0.82\ \mu m$ وذي عرض طيفي مقداره $1\ nm$ و $20\ nm$.

3 ـ 7 ـ احسب الانعكاسية عند حد فصل من Al Ga As إلى هواء (عند ورود عمودي) . واحسب خسارة الإرسال بالديسيبل .

3 ـ 8 ـ ارسم بيانياً الانعكاسية مقابل زاوية الورود إذا كان : $n_1=1.48$ و $n_2=1.46$ وذلك من أجل استقطابي s و p .

3 ـ 9ـ برهن صحة المعادلة (3 ـ 31) .

3 ـ 10 ـ استعمل المعادلة (3 ـ 33) لرسم الموجة المضمحلة $e^{-\alpha z}$ مقابل z إذا كانت : $n_1=1.48$ و $n_2=1.46$ وطول الموجة يساوي $0.82\ \mu m$ و $0<z<4\ \mu m$ وزاوية الورود Θ_i تساوي $82°$. كرر الرسم من أجل زوايا ورود Θ_i تساوي $84°$ و $86°$ و $88°$ و $90°$.

3 ـ 11 ـ باستعمال علاقة اعتماد الخسارة على التردد (المعادلة 3 ـ 17) بيِّن ان $f_{1\text{-dB}}=0.58\ f_{3\text{-dB}}$.

3 ـ 12 ـ منبع يبث موجتين (λ_1 و λ_2) ويُعدَّل تعديل شدة عند تردد f_m .
القدرة عند λ_1 هي :

$$P_1 = P_{01} + P_{11} \cos(\omega_{mt} + \Phi_1)$$

والقدرة عند λ_2 هي :

$$P_2 = P_{02} + P_{22} \cos(\omega_{mt} + \Phi_2)$$

أوجد تعبيراً للقدرة الكلية . افترض الآن ان : $f_m = 1\ kHz$ وانه عند المستقبل : $P_{01}=P_{02}=2\ \mu W$ و $P_{11}=P_{22}=1\ \mu W$. ارسم P_1 و P_2 والقدرة الكلية (كتابع للزمن) إذا كان : $\Phi_2-\Phi_1=0$ و $\Phi_2-\Phi_1=3.14\ rad$. وارسم قيمة القدرة المتناوبة (من القمة للقمة) مقابل $(\Phi_2-\Phi_1)$.

المراجع

الفصل الثالث

1. Good introductions to electromagnetic waves appear in numerous texts. These include
   William H. Hayt, Jr. *Engineering Electromagnetics*. 4th ed. New York: McGraw-Hill Book Comapny, 1981.

الفصل الرابع

أدلة الموجة البصرية المتكاملة
Integrated Optic Waveguides

إن البصريات المتكاملة هي تكنولوجيا إنشاء أجهزة وشبكات بصرية على طبقات تحتية وهي مماثلة لإنشاء الدارات الالكترونية المتكاملة . يستعمل في وصف هذا المجال المصطلحان التاليان : البصريات الالكترونية المتكاملة والفوتونيات المتكاملة . تشير الفوتونيات ذاتها إلى أي نظام يجمع البصريات والالكترونيات . تقدم البصريات المتكاملة إمكانية جمع المكونات البصرية والالكترونية على طبقة تحتية واحدة لانتاج أنظمة وظيفية أو أنظمة فرعية . يكون للمكونات المتكاملة في الغالب أبعاد من فئة طول الموجة الضوئية وتتمتع هذه التكنولوجيا بالعديد من ميزات الدارات المتكاملة كالمتانة والحجم الصغير والكلفة المنخفضة . يمكن تصميم مستقبلات ومرسِلات ومكرِّرات بصرية كاملة من أجل الاتصالات لمسافات طويلة بواسطة الألياف البصرية .

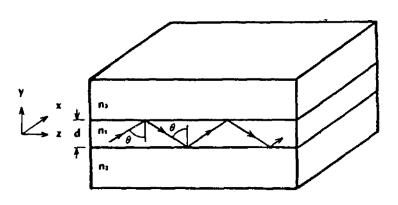
يجري ضمن شبكة بصرية متكاملة انتقال الضوء بين المكونات بواسطة دليل موجي طبقي عازل مستطيل . وبسبب دور الطبقة في البصريات المتكاملة ولكونها تشبه الليف البصري سنبحث كيف ينتشر الضوء فيها . إن دراسة مسير الضوء في الطبقة سيساعدنا في تصور الانتشار في الألياف . سنعالج الطبقة قبل

أن نتطرق إلى الليف وذلك لأن تحليل بنية مستطيلة الشكل أسهل كثيراً من تحليل ليف دائري الشكل .

إضافة إلى دليل الموجة الطبقي سيغطي هذا الفصل بإيجاز المكونات المتكاملة والاقتران مع الدارات المتكاملة . سنبين أيضاً بعض الأمثلة عن تصاميم الشبكات البصرية المتكاملة .

(4 ـ 1) ـ دليل موجي طبقي عازل
Dielectric Slab Waveguide

يظهر الدليل الموجي الطبقي العازل في الشكل (4 ـ 1) . تنتشر الموجة أولاً في الطبقة المركزية ذات دليل الانكسار n_1 . إن هذه الطبقة صغيرة جداً وغالباً ما تكون أقل من ميكرومتر واحد ويشار إليها كغشاء بين طبقتين . طبقة سفلى وطبقة عليا لهما دليلي انكسار n_2 و n_3 على التتالي فتنحصر الأشعة الضوئية في الغشاء بواسطة الانعكاس الداخلي الكلي . وكما وجدنا في الفصل السابق



شكل (4 ـ 1) ـ دليل موجي طبقي عازل .

يمكن أن يتم ذلك إذا كان كل من n_2 و n_3 أصغر من n_1 . من المعادلة (3 ـ 32) يمكن إيجاد الزاوية الحرجة عند الحد الفاصل الأدنى من العلاقة التالية ·

$$\sin \Theta_c = \frac{n_2}{n_1} \qquad (1\text{-}4)$$

بينما تعطى الزاوية الحرجة عند الحد الفاصل الأعلى بالعلاقة التالية :

$$\sin \Theta_c = \frac{n_3}{n_1} \qquad (2\text{-}4)$$

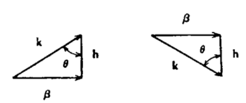
إن الزاوية Θ في الشكل (4 ـ 1) يجب أن تساوي أو تكون أكبر من كبرى هاتين الزاويتين الحرجتين إذا كان للضوء أن ينتشر من غير تسرب إلى الطبقات الخارجية . ومن أجل الحصول على انعكاس كلي يجب أن تكون الحدود الفاصلة ملساء وإلا فإن الانعكاسات المبعثرة ستنثر الضوء خارج الطبقة الموجِّهة . وبالمثل سيؤدي عدم التجانس في الغشاء إلى انتشار الضوء وزيادة الخسارات . وأخيراً من أجل إرسال فعال يجب أن يكون امتصاص المادة صغيراً . إن المادتين الرائجتين من أجل البصريات المتكاملة هما ليثيوم نيوبات ($Li\,Nb\,O_3$) وزرنيخ الغاليوم (Ga As) لهما على التوالي خسارات بحدود **1 dB/cm** وأكثر بقليل من **2 dB/cm** . إن هذا مقدار من الخسارة مقبول للأطوال القصيرة المستخدمة في الشبكات المتكاملة . إن المواد المستعملة في الألياف ذات خسارة أقل بكثير كما يتطلبه الأمر من أجل الاتصالات للمسافات الطويلة . لقد لاحظنا في الفقرة الخاصة بالانعكاسات عند الزاوية الحرجة بأنه يوجد حقل مضمحل خلف الحد الفاصل العاكس . لذا يجب أن يكون الامتصاص في الطبقتين العليا والسفلى لدليل **الموجة** العازل صغيراً أيضاً .

إن البنية المتناظرة حيث: $n_2 = n_3$ تكون مهمة على وجه الخصوص لأنها تشبه إلى حد بعيد ليفاً بصريا . إن الليف المماثل له نواة ذات دليل إنكسار n_1 محاطة بكساء ذي دليل انكسار n_2 . إن دليل **الموجة** غير المتناظر الذي فيه $n_3=1$ هو أيضاً مهم . وهذا هو شكل دارة بصرية متكاملة مفتوحة من الأعلى للهواء . في هذه الحالة يكون n_2 هو دليل انكسار الطبقة التحتية . سنعتبر أدلّة **الموجة** المتناظرة وغير المتناظرة في فقرات منفصلة من هذا الفصل .

إن الحقل في الغشاء هو موجة مستوية من النوع الذي نوقش في الفصل 3 **يتعرج** ذهاباً وإياباً بزاوية Θ (انظر الشكل 4 ـ 1) . وبشكل متشابه إلى حد ما. **يمكن أن** ننظر إلى الحقل الكلي كمجموع موجتين مستويتين منتظمتين إحداهما

تنتشر نحو الأعلى بزاوية Θ وتنتشر الأخرى نحو الأسفل بنفس الزاوية أيضاً. وكما عرض في الفصل 3 إن لهذه الأمواج عامل انتشار يمكن أن يكتب كما يلي : $k=k_o n_1$ حيث k_o هو عامل الانتشار في الفراغ الحر ويبين الشكل (4 ـ 2) عامل الانتشار من أجل الموجتين . إن اتجاه المسير النهائي لموجة موجّهة هو أفقي في هذا الشكل وأن مركبة عامل الانتشار في هذا الاتجاه هي :

$$\beta = k \sin \Theta = k_o n_1 \sin \Theta \qquad (3\text{-}4)$$



شكل (4 ـ 2) ـ عوامل الانتشار لأمواج في دليل موجة طبقي .
$\beta = k \sin \Theta$, $h = k \cos \Theta$

سندعو هذا عامل الانتشار الطولي . وبسبب التداخل بين الموجتين المنتشرتين نحو الأعلى ونحو الأسفل لا يكون الحقل منتظماً خلال الاتجاه y إلا أنه يتغير جيبياً . وهذا التغير هو نمط الموجة الجيبية . يمكن كتابة الحقل في الغشاء كما يلي :

$$E = E_1 \cos hy \sin (\omega t - \beta z) \qquad (a\text{-}4\text{-}4)$$

وذلك من أجل أساليب (modes) موزعة بالتساوي حول المستوى $y=0$. يوجد أيضاً حقول ذات توزع فردي تمثل بالعلاقة التالية :

$$E = E_1 \sin hy \sin (\omega t - \beta z) \qquad (b\text{-}4\text{-}4)$$

في هذه المعادلات $h=k \cos \Theta$ هي المركبة الشاقولية لـ k .

إن مقارنة بالمعادلة (3 ـ 1) من أجل موجة غير موجّهة تبين نفس التغير خلال اتجاه الانتشار ما عدا من أجل استبدال k بـ β . وباجراء هذا التبديل في

المعادلة (3 ـ 2) يمكن أن نكتب العلاقة بين سرعة موجة دليل الموجة v_g وبين عامل الانتشار الطولي على الشكل التالي :

$$\beta = \frac{\omega}{v_g} \qquad (5\text{-}4)$$

أو

$$v_g = \frac{\omega}{\beta} \qquad (6\text{-}4)$$

لقد عرّفنا دليل الإنكسار كما يلي : هو سرعة الضوء في الفراغ الحر مقسومة على السرعة في وسط غير محدود . سنعرِّف الآن دليل الإنكسار الفعال n_{eff} وهو السرعة في الفراغ الحر مقسومة على السرعة الموجَّهة .أي أن : $n_{eff}=c/v_g$. حينئذ وباستعمال المعادلة (4 ـ 6) ينتج : $n_{eff}=c\beta/\omega$. ومن المعادلة (3 ـ 4) يكون عامل الانتشار في الفراغ الحر هو : $k_0=\omega/c$ وهكذا نجد أن :

$$n_{eff} = \frac{\beta}{k_o} \qquad (7\text{-}4)$$

أو باستعمال المعادلة (4 ـ 3) أن :

$$n_{eff} = n_1 \sin \Theta \qquad (8\text{-}4)$$

إن دليل الانكسار الفعال هو المعلمة (parameter) الرئيسية في الانتشار الموجّه تماماً مثل دليل الانكسار في انتشار الموجة غير الموجّه .

تتخامد الحقول المضمحلة خارج الغشاء أسيا بعامل تخامد يعطى بالمعادلة (3 ـ 33) .

(4 ـ 2) ـ الأساليب في دليل الموجة الطبقي المتناظر
Modes in the Symmetric Slab Waveguide

لنعتبر دليل الموجة المتناظر . سيحدث انعكاس كلي من أجل جميع الزوايا التي هي أكبر من الزاوية الحرجة وحتى °90 . ومن أجل شعاع بزاوية °90 فإنه

سينتشر أفقيا في دليل الموجة وفق خط مستقيم كما في الشكل (4 ـ 1) . وحيث أنه من أجل هذا الشعاع تكون $\Theta=90°$ فإن دليل الإنكسار الفعال يكون $n_{eff}=n_1$. نستنتج أن شعاعاً يسير موازياً إلى الطبقة يملك دليلاً فعالاً يعتمد على الغشاء الموجِّه فقط . ومن أجل شعاع عند الزاوية الحرجة يكون $\sin\Theta_c=n_2/n_1$ وهكذا وبموجب المعادلة (4 ـ 8) ينتج: $n_{eff}=n_2$. يعتمد الدليل الفعال من أجل أشعة بزاوية حرجة على المادة الخارجية فقط . وتنتشر الأشعة عند الزاوية الحرجة بانحدار أكثر بالنسبة الى محور دليل الموجة من أي أشعة محصورة أخرى . لقد قررنا الآن أن دليل الإنكسار الفعال يحدد بأدلة انكسار الغشاء وما يحيط به . إن جميع زوايا الشعاع للأمواج المنتشرة تقع بين Θ_c و $90°$ وتقع أدلّة الانكسار الفعالة المطابقة في المدى التالي :

$$n_2 \leqslant n_{eff} \leqslant n_1 \qquad (9\text{-}4)$$

شرط الأسلوب **The Mode Condition** :

صحيح أن جميع الأمواج ذات اتجاهات شعاع تقع بين الزاوية الحرجة و $90°$ ستحجز ضمن الغشاء بفعل الانعكاس الكلي . وليس صحيحاً على أي حال أن جميع هذه الأمواج ستنتشر خلال تلك البنية . وفي الحقيقة أنه يسمح فقط لبعض اتجاهات الشعاع وإن الاتجاهات المسموح بها تنسجم مع أساليب دليل الموجة . يمكن أن نفهم وجود هذه الأساليب بالتماثل مع حالات الطنين التجويفي التي وردت في الفقرة (3 ـ 4) . وجدنا في تلك الفقرة أنه تحدث أنماط تداخل مستقرة (أساليب التجويف) فقط عندما يساوي انزياح الطور لدورة كاملة متكررة عدداً صحيحاً لأمثال 2π راديان . وبتسمية $\Delta\phi$ انزياح الطور للدورة الكاملة يمكن أن نكتب شرط طنين التجويف كما يلي :

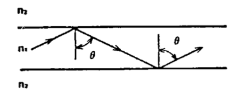
$$\Delta\phi = m\,2\pi \qquad (10\text{-}4)$$

حيث m هي عدد صحيح .

تتحقق هذه المعادلة بعدد من أطوال الموجة من أجل طول تجويف ثابت . يمكن أيضاً معاملة دليل الموجة الطبقي كتجويف وذلك لأنه يملك حدي فصل

عاكسين وبدلاً من أن تتحرك الأمواج ذهاباً وإياباً على نفس الخط فإنها تنتشر في الطبقة بزاوية ما . ولا تزال الأمواج المنتشرة إلى الأعلى وإلى الأسفل تتراكب وتتداخل . وأن شرط الطنين (المعادلة 4 ـ 10) يجب أن يبقى محققاً من أجل الحصول على نمط تداخل مستقر . في هذا المثال يحدث انزياح الطور خلال دورة كاملة من المسار المتعرج كما يبينه الشكل (4 ـ 3) . ويساوي هذا الانزياح مجموع انزياح الطور على طول المسار وانزياح الطور الذي يحدث عند كل من حدي الفصل العاكسين . وإذا احتاج الأمر يمكن تحديد هذين الانزياحين الأخيرين من معادلتي معامل الانعكاس ، المعادلة (3 ـ 29) والمعادلة (3 ـ 30) .

يمكننا تغيير طول المسار وبالتالي تغيير انزياح الطور الكلي من أجل طول موجة ثابت وذلك بتغيير اتجاه الشعاع . وبتحقيق هذا يمكن أن نجد أنه تتحقق المعادلة (4 ـ 10) من أجل عدة زوايا متميزة . وتكون الأمواج المنتشرة على هذه الزوايا هي أساليب دليل الموجة وهي اتجاهات الانتشار المسموحة . وأن الأمواج التي زوايا شعاعها لا تحقق المعادلة (4 ـ 10) ستضعف بسرعة بسبب التداخل التهديمي .

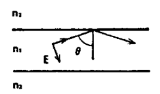


شكل (4 ـ 3) ـ دورة واحدة من المسار المتعرج لأسلوب منتشر . ينزاح طور الموجة على طول مسارها وعند حدود الفصل العاكسة .

استقطاب (Polarization) TE و TM

كما في حال الانعكاس من حد فاصل مستوٍ نقسم المسألة إلى الاستقطابين الممكنين : عمودي على مستوى الورود ومواز له . نرى في الشكل (4 ـ 1) أن المستوى yz هو مستوى الورود . إن حقلاً كهربائياً موجهاً في الاتجاه x يطابق

الاستقطاب العمودي أو الاستقطاب s . وتسمى الأمواج التي بهذا الاستقطاب الحقول الكهربائية العرضية TE وذلك لأن متجه الحقل الكهربائي يقع كلياً في مستوى (المستوى xy) متعارض مع اتجاه المسير النهائي (الاتجاه z) . يبين الشكل (4 ـ 4) الاستقطاب المتوازي أو الاستقطاب p . في هذه الحالة لا يكون الحقل



شكل (4 ـ 4) ـ موجة TM (استقطاب p) في دليل الموجة الطبقي .

الكهربائي عرضياً تماماً حيث يملك مركبة على طول الاتجاه z . وعلى أي حال إن الحقل المغناطيسي الذي يتجه في الاتجاه x من أجل هذا الاستقطاب يكون عرضياً كلياً . ويسمى لذلك الاستقطاب p الاستقطاب المغناطيسي العرضي TM في الدليل الطبقي .

مخطط الأسلوب TE Mode Chart

من أجل أساليب TE زوجية (تلك التي لها تناظر زوجي في المستوى العرضي) يكون حل المعادلة (4 ـ 10) كما يلي :

$$\tan\ (hd/2) = \frac{1}{n_1 \cos \Theta} \sqrt{(n_1^2 \sin^2 \Theta - n_2^2)} \qquad (11\text{-}4)$$

حيث أن : $h = k \cos \Theta = (2\pi n_1/\lambda) \cos \Theta$

و λ هو طول الموجة في الفراغ الحر . ومن أجل الأساليب الفردية تستبدل hd/2 بالمقدار (hd/2) - (π/2) . إذا عرفت ثخانة الغشاء من الصعب أن نحدد زاوية الشعاع Θ مباشرة من المعادلة (4 ـ 11) . من الأسهل أن نختار زوايا شعاع مختلفة (بين Θ_c و 90°) ونقوم بالحل من أجل الثخانات المطابقة . يعطي رسم بياني للنتائج العلاقة بين الثخانة وزاوية الانتشار وسيوضح المثال التالي الطريقة .

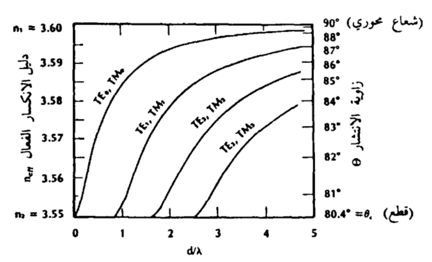
من أجل طبقة متناظرة لتكن $n_1=3.6$ و $n_2=3.55$. إن هذه القيم هي من خصائص ثنائي ليزري ذي الوصلة المتناظرة المضاعفة Al Ga As وسندرس مثل هذا المنبع في الفصل السادس . إن الزاوية الحرجة لمثل هذه البنية هي $\Theta_c=\sin^{-1}(n_2/n_1)=80.4°$. ويكون حينئذ مدى الزوايا من أجل أشعة محصورة هو $80.4°\leqslant\Theta\leqslant90°$ ويكون مجال دليل الانكسار $3.55\leqslant n_{eff}\leqslant3.6$. يبين الجدول (4 ـ 1) بعضاً من الحسابات المستخدمة في حل المعادلة (4 ـ 11) . إن العمود الأول في الجدول هو الزاوية المختارة . وفي العمود الثاني نجد دليل الانكسار الفعال المحسوب من المعادلة (4 ـ 8) . وقد حسب بعد ذلك الجانب الأيمن من المعادلة (4 ـ 11) ويظهر في العمود الثالث . ومن قيم $\tan(hd/2)$ هذه تحسب hd ذاتها التي ترد في العمود الرابع وتقدر النتائج بالراديان . وبملاحظة أن $hd=(2\pi/\lambda)n_1\ d\cos\Theta$ يمكن أن نحسب d/λ من العلاقة التالية :

$$d/\lambda = \frac{hd}{2\pi n_1\ \cos\Theta}$$

جدول (4 ـ 1) ـ حسابات الأسلوب TE_o

Θ	n_{eff}	tan (hd/2)	hd	$2\pi n_1 \cos\Theta$	d/λ
80.4°	3.550	0	0	3.757	0
82°	3.565	0.651	1.155	3.148	0.367
84°	3.580	1.235	1.780	2.364	0.753
86°	3.591	2.161	2.275	1.578	1.442
88°	3.598	4.653	2.718	0.789	3.445
90°	3.600	∝	3.142	0	∝

وقد ورد في العمود الخامس قيمة مقام هذا التعبير . ويمكن حينئذ حساب d/λ من قسمة العمود الرابع على العمود الخامس وبيان النتائج في العمود الأخير . فلو حددنا طول الموجة في الفراغ الحر يمكن عندئذ إيجاد الثخانة . ويعتبر الشكل d/λ المقيَّس مفيداً أيضاً . إن نتائج الحسابات الواردة في الجدول (4 ـ 1) مرسومة في الشكل (4 ـ 5) وتسمى المنحنى TE_o ويدعى هذا النوع من الأشكال مخطط الأسلوب . يمكن أن نكوِّن عدة استنتاجات عن الأسلوب TE_o من مخطط أسلوبه . عندما تكون ثخانة الغشاء صغيرة جداً $(d/\lambda<<1)$ يسير الشعاع



شكل (4 ـ 5) ـ مخطط الأسلوب للطبقة المتناظرة . n_1=3.6 و n_2=3.55

قريباً من الزاوية الحرجة ويكون الدليل الفعال هو ذلك الذي يخص الطبقة الخارجية n_2 . من أجل الغشاء الرقيق تخترق الموجة بعمق في الطبقات الخارجية وذلك لأن الأشعة تكون قرب الزاوية الحرجة . في هذه الحالة يكون التضاؤل بطيئاً كما جرت مناقشته في الفقرة (3 ـ 6) . وعندما تزداد الثخانة ينتشر الشعاع بزاوية أكبر بمعنى أن الشعاع يسير تقريباً أكثر موازاة إلى محور دليل الموجة وإن دليل الانكسار الفعال يقع بين n_1 و n_2 . ومن أجل غشاء ثخين جداً (d/λ>>1) يكون الدليل الفعال هو الخاص بالغشاء ذاته . في هذه الحالة تتلاشى الموجة في الطبقة الخارجية بسرعة كبيرة جداً كما جرت مناقشته في الفقرة (3 ـ 6) من أجل أمواج تنتشر بزوايا بعيدة جداً عن الزاوية الحرجة .

الأساليب ذات المراتب الأعلى Higher-Ordered Modes

حيث أن التابع الظلي يكرر ذاته يكون للمعادلة (4 ـ 11) حلولاً متعددة . من أجل أي قيمة معطية من زاوية الانتشار يوجد مجموعة من ثخانات الغشاء تسمح للأشعة باتباع ذلك الاتجاه . لقد أخذنا في الجدول (4 ـ 1) حل المعادلة (4 ـ 11) الذي يعطي أصغر قيمة من الثخانة المقيسة d/λ . يرمز إلى هذا الحل بالرمز $(d/\lambda)_o$ وتكون عندئذ الحلول الأخرى (بما فيها الأساليب الزوجية والفردية) هي :

$$(d/\lambda)_m = (d/\lambda)_o + \frac{m}{2n_1 \cos \Theta} \qquad (12-4)$$

حيث m هو عدد صحيح موجب . وكل قيمة من m تطابق أسلوب دليل موجة مسموح به مختلف . وتزداد الثخانة المقيسة بالكمية التالية بين أساليب متتالية :

$$\Delta(d/\lambda) = \frac{1}{2n_1 \cos \Theta} \qquad (13-4)$$

من أجل دليل موجة Al Ga As متناظر فقد جرى حساب المعادلة (4 ـ 13) وإضافتها الى $(d/\lambda)_o$ وقد أوردت النتائج في الجدول (4 ـ 2) من أجل الأساليب TE الأربعة الاولى وقد رسمت على مخطط الاسلوب في الشكل (4 ـ 5) . من أجل ثخانة وطول موجة ثابتين ، يبين المخطط عدة حلول وسيوضح المثال التالي هذه النقطة .

جدول (4 ـ 2) حسابات الاسلوب TE_m

Θ	n_{eff}	TE_0 $(d/\lambda)_0$	$\Delta(d/\lambda)$	TE_1 $(d/\lambda)_1$	TE_2 $(d/\lambda)_2$	TE_3 $(d/\lambda)_3$
80.4°	3.550	0	0.836	0.836	1.672	2.508
82°	3.565	0.367	0.998	1.365	2.363	3.360
84°	3.580	0.753	1.329	2.082	3.410	4.739
86°	3.591	1.442	1.991	3.433	5.424	7.415
88°	3.598	3.445	3.980	7.425	11.40	15.38
90°	3.600	∝	∝	∝	∝	∝

مثال :

أوجد زوايا الانتشار وأدلّة الانكسار الفعالة وعدد أساليب TE في دليل موجة Al Ga As إذا كان $d=1.64\ \mu m$. وطول الموجة في الفراغ الحر $\lambda=0.82\ \mu m$.

الحل :

نحسب أولاً : من أجل $d/\lambda=2$ فيعطي الشكل (4 ـ 5) ثلاثة حلول لـ TE هي :

$$TE_0\ ,\ n_{eff} = 3.594,\ \Theta = 86.7°$$

$$TE_1\ ,\ n_{eff} = 3.578,\ \Theta = 83.7°$$

$$TE_2\ ,\ n_{eff} = 3.557,\ \Theta = 81.1°$$

يمكن أن يوجد في آن واحد ثلاثة أساليب في دليل الموجة هذا . وترحل الأساليب بزوايا مختلفة وبأدلّة انكسار فعالة مختلفة .

في المثال السابق لا يتمكن الاسلوب TE_3 من الانتشار وذلك لأن d/λ لم تكن كبيرة بما فيه الكفاية فيقطع (cut off) هذا الأسلوب وجميع الأساليب ذات المراتب الأعلى (الأساليب ذات قيم m الأعلى) . يحدث القطع عندما تساوي زاوية الانتشار من أجل اسلوب معطي تماماً الزاوية الحرجة . وبوضع هذه المعلومات في المعادلة (4 ـ 11) ينتج شرط القطع من أجل الاسلوب TM ذي المرتبة m وهو :

$$(d/\lambda)_{mc} = \frac{m}{2\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}} \qquad (14\text{-}4)$$

فإذا كانت d/λ أقل من هذه القيمة فلن ينتشر الاسلوب ذو المرتبة m . يمكن أن نحدد عدد الأساليب المنتشرة المسموح لها بواسطة ثخانة غشاء محددة وذلك بحل هذه المعادلة من أجل m . ان الاسلوب ذا المرتبة الأعلى الذي يمكن أن ينتشر له قيمة m تعطى بقيمة الجزء الصحيح من المعادلة التالية :

$$m = \frac{2d\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}}{\lambda} \qquad (15\text{-}4)$$

وحيث أن الاسلوب ذا المرتبة الصغرى له m=0 يكون عدد أساليب TE المنتشرة في الدليل الطبقي المتناظر هو العدد الصحيح من المعادلة التالية :

$$N = 1 + \frac{2d\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}}{\lambda} \qquad (16\text{-}4)$$

لكي نخفض حتى الحد الأدنى عدد الأساليب يمكن أن نجعل d/λ صغيراً أو نجعل n_2 قريباً من n_1 . إذا رغبنا أن ننشر الاسلوب TE_o فقط يجب أن يكون لدينا بموجب المعادلة (4 ـ 14) ما يلي :

$$d/\lambda < \frac{1}{2\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}} \qquad (17\text{-}4)$$

إن هذا يقطع الاسلوب m=1 وجميع الأساليب ذات المرتبة الأعلى .

مثال :

احسب أكبر ثخانة تضمن عمل اسلوب TE وحيد عند 0.82 μm في دليل موجة طبقي Al Ga As .

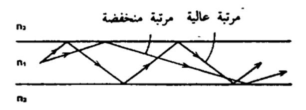
الحل :

باستعمال المعادلة (4 ـ 14) نجد الثخانة العظمى وهي :

$$d = \frac{0.82}{2\sqrt{(3.6^2 - 3.55^2)}} = 0.686\ \mu m$$

لاحظ كم يجب أن يكون الغشاء رقيقاً إذا كنا نرغب أن يقتصر دليل الموجة على اسلوب انتشار TE واحد فقط .

إن دليل موجة متعدد الأساليب هو الدليل الذي يتحمل أكثر من اسلوب انتشار واحد . وكما يبينه الشكل (4 ـ 5) من أجل دليل موجة كهذا وعند ثخانة ثابتة تنتشر الأساليب ذات المرتبة الأعلى بزوايا أصغر من الأساليب ذات المرتبة الأدنى . ويعني هذا أن أشعة الأساليب ذات المرتبة الأعلى تنتشر بانحدار أكبر بالنسبة لمحور دليل الموجة مما تفعله أشعة الأساليب ذات المرتبة الأدنى ويوضح الشكل (4 ـ 6) هذه الحال .



شكل (4 ـ 6) ـ مسارات الشعاع لأساليب عالية ومنخفضة المرتبة

مخطط الاسلوب TM The TM Mode Chart

سنعتبر الآن مخطط الاسلوب من أجل الاسلوب TM . تكون حلول المعادلة (4 ـ 10) من أجل أساليب زوجية لها هذا الاستقطاب كما يلي :

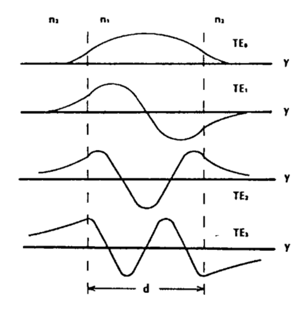
$$\tan(h\, d/2) = \frac{n_1}{n_2^2 \cos\Theta} \sqrt{(n_1^2 \sin^2\Theta - n_2^2)} \qquad (18\text{-}4)$$

ومن أجل أساليب فردية تستبدل hd/2 بـ (hd/2)-(π/2) . تختلف المعادلة (4 ـ 18) عن معادلة الاسلوب TE . وعلى أي حال إذا كان n_1 قريباً من n_2 يكون الاختلاف مهملاً . يتحقق هذا الشرط من أجل المثال Al Ga As الذي له n_1=3.6 و n_2=3.55 وهكذا تكون نتائج TM تقريباً مماثلة الى تلك الخاصة بحالة TE . ويفسر هذا لماذا تحمل المنحنيات في الشكل (4 ـ 5) تسمية كل من TE و TM فكل منحني يمثل اسلوبين لهما تقريباً نفس الدليل الفعال وزاوية الانتشار إلا أن متجهات الحقل الكهربائي لها تتوجه باتجاهات متعامدة . يقال عن اسلوبين لهما نفس عامل الانتشار أنهما مندمجان . في المثال الحالي يكون الاسلوبان TM و TE اللذان لهما المرتبة ذاتها تقريباً مندمجين .

حتى عندما لا تكون n_1 قريبة من n_2 يكون لكل من TE_m و TM_m قيم القطع ذاتها وهكذا تنطبق المعادلة (4 ـ 14) على كلتا الحالتين ويتبع هذا حينئذ أن رقم أساليب TM المنتشرة تساوي رقم أساليب TE كما تعطيه القيمة الكاملة للمعادلة (4 ـ 16) . يكون العدد الاجمالي للأساليب المسموح بها ضعف عدد أساليب TEالتي تم الحصول عليها من تلك المعادلة . لا يمكن الحصول على عمل وحيد لاسلوب بأن نجعل فقط الغشاء رقيقاً وذلك لأن كلاً من الاسلوبين TE_o و TM_o ينتشران من أجل ثخانات متناهية في الصغر . يمكن الحصول على اسلوب وحيد في غشاء يخضع للمعادلة (4 ـ 17) وذلك باخضاع الضوء القادم لاستقطاب في الاتجاه الموافق الى الاسلوب TE_0 مباشرة أو الى الاسلوب TM_0 مباشرة . يمكن أن تؤدي العيوب في دليل الموجه أو الانقطاع (اللا استمرارية) فيه الى إزالة استقطاب الضوء وتهييج الاسلوب غير المطلوب لذلك يجب أن نكون حذرين عند استعمالنا هذه التقنية .

نمط الاسلوب Mode Pattern

إن تغير الضوء في المستوى العرضي وفقاً لمحور دليل الموجة هو نمط الاسلوب العرضي . وبموجب المعادلة (4 ـ 4) يتغير الحقل الكهربائي في الغشاء جيبياً عبر المستوى العرضي . يوجد خارج الغشاء حقل مضمحل متخامد . ويزداد الاختراق في الطبقة الخارجية بازدياد مرتبة الاسلوب m . يحدث هذا لأن زاوية الشعاع تقترب من الزاوية الحرجة عندما تزداد m ويزداد اختراق الموجة (كما نوقش في الفقرة 3 ـ 6) عندما تقترب زاوية الشعاع من Θ_c . من أجل طول موجة وثخانة ثابتين يكون لكل اسلوب نمط مختلف . وقد رسم في الشكل (4 ـ 7) بضع منها . يمكن أن نعين من هذا الشكل العدد الصحيح m وهو عدد المرات التي يمر فيها الحقل الكهربائي خلال الصفر في المستوى العرضي .



شكل (4 ـ 7) ـ أنماط أسلوب عرضي في دليل الموجة الطبقي المتناظر.

ويوضح هذا الشكل أيضاً التناظر الفردي أو الزوجي من الأساليب . في أدلّة الموجة الحقيقية تتخامد الأمواج بفعل الامتصاص absorption والانتشار scattering . يؤدي عدم تجانس المادة وعيوب حد الفصل الى حدوث الانتشار . ان الأساليب ذات المرتبة الأعلى والزوايا الأكثر انحداراً تنتشر الى مسافة أبعد من الأساليب ذات المرتبة الأدنى على طول مسار التعرج zigzagging . لهذا السبب

تعاني الأساليب ذات المرتبة الأعلى من خسارات امتصاص أكبر ويؤدي الانتثار الى انحرافات في مسار الشعاع . إن الأساليب القريبة من القطع (وهي الأساليب ذات المرتبة الأعلى) تكون أشعتها قريبة من الزاوية الحرجة . يمكن أن تنحرف هذه الأشعة بسهولة تحت الزاوية الحرجة حيث ستشع طاقة الاسلوب نحو الطبقة التحتية . وأخيراً تملك الأساليب ذات المرتبة الأعلى حقولاً تخترق بعمق الطبقة التحتية وتكون بهذا أكثر قابلية للامتصاص في تلك المنطقة .

(4 ـ 3) ـ الأساليب في دليل الموجة الطبقي غير المتناظر

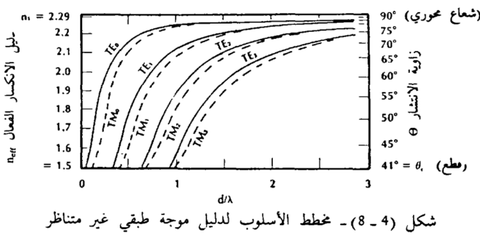
Modes in the Assymetric Slab Waveguide

إن الطبقة غير المتناظرة هي البنية المستعملة بشكل شائع في الدارات البصرية المتكاملة . سنعتبر دليل موجة له $n_1=2.29$ و $n_2=1.5$ و $n_3=1$. حيث يمثل هذا غشاء من كبريت التوتياء (ZnS) على طبقة تحتية زجاجية وبحيث يكون السطح الأعلى من الغشاء مكشوفاً للهواء . تتناسب القيمة $n_1=2.29$ من أجل (ZnS) عند $1.06\ \mu m$. وبين $0.6\ \mu m$ و $1.4\ \mu m$ تقع n_1 بين 2.37 و 2.28 . تكون الزاوية الحرجة عند السطح البيني من ZnS الى هواء : $\Theta_c=\sin^{-1}(1/2.29)=25.9°$ بينما عند السطح البيني من (ZnS) الى زجاج تكون : $\Theta_c=\sin^{-1}(1.5/2.29)=41°$.

إن غشاء ZnS يحصر الأشعة بين 41° و 90° . بينما تعكس الأشعة الواقعة بين 25.9° و 41° كلياً عند حد فصل من ZnS الى زجاج . وستتسرب هذه الأشعة الضوئية الى الطبقة التحتية فينتج عن هذا خسارات عالية . سنعتبر في بقية هذه الفقرة فقط الأمواج المحصورة كلياً . من المعادلة : (4 ـ 8) نجد المحددات على قيمة n_{eff} : $n_{eff}=n_1\sin\Theta$ وعندما: $\Theta=90°$ تكون $n_{eff}=n_1$. عند الزاوية الحرجة من أجل سطح بيني من ZnS الى زجاج تكون $\sin\Theta=\dfrac{n_2}{n_1}$ وهكذا تكون $n_{eff}=n_2$. ويكون مدى الدليل الفعال من أجل طبقة غيرمتناظرة هو

$$n_2 \leqslant n_{eff} \leqslant n_1 \qquad (19\text{-}4)$$

يظهر على الشكل (4 ـ 8) مخطط الاسلوب وقد تم الحصول عليه من حلول مشاهبة للمعادلتين (4 ـ 11) و (4 ـ 18) . بسبب هذا التشابه وبسبب تعقيدها فقد حذفت المعادلات التي تؤدي الى الشكل (4 ـ 8) . يبين مخطط الاسلوب فقط الأساليب TM و TE الأربعة الاولى . في حال الطبقة غير المتناظرة لا يحدث قطع الاسلوب ذي المرتبة الأدنى TE_0 عند ثخانة تساوي صفراً كما يحدث من أجل الحالة المتناظرة . ومن مخطط الاسلوب إذا كان $d/\lambda<0.05$ فلن توجد أمواج منتشرة . ويكون دليل الموجة بكامله في وضع القطع .

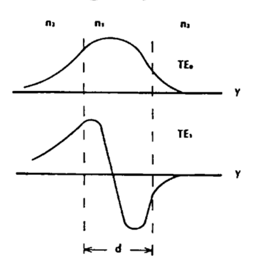


شكل (4 ـ 8) ـ مخطط الأسلوب لدليل موجة طبقي غير متناظر

$n_1=2.29$ و $n_2=1.5$ و $n_3=1.0$

حيث أن n_1 و n_2 و n_3 ليست متقاربة فلن تكون أساليب TM و TE مندمجة وستكون منفصلة تماماً . يوجد دليل موجة ذو اسلوب وحيد حقيقي إذا كان الاسلوب TM_0 مقطوعاً (وليس الاسلوب TE_0) . نرى من الشكل (4 ـ 8) أن هذا يحدث إذا كان $d/\lambda<0.12$ ، قيمة القطع لاسلوب TM_0 في هذا المثال . من أجل أطوال موجة من فئة 1 μm ستكون ثخانة دليل طبقي ZnS ذي اسلوب وحيد أقل من 0.12 μm . إن الدارات البصرية المتكاملة تكون عادة بنى غير متناظرة ذات اسلوب وحيد . وان الأغشية الرقيقة القادرة على انتشار وحيد الاسلوب تحضر عادة باستعمال تقنيات مثل الانتشار Diffusion وذر الترددات الراديوية RF Sputtering والتبخير بالتفريغ Vaccum evaporation والقصف الايوني Ion bombardment .

تشبه أنماط الاسلوب من أجل طبقة غير متناظرة تلك الخاصة بدليل موجة متناظر . لا يزال مؤشر الاسلوب m يمثل عدد مرات العبور بالصفر . يؤدي عدم التناظر الى أن يكون للحقول اتساعات غير متساوية عند حدي الفصل وأن تتلاشى هذه الحقول بمعدلات مختلفة في الطبقتين الأعلى والأدنى . يظهر على الشكل (4 ـ 9) أنماط الاسلوب التي توضح هذه المظاهر .



شكل (4 ـ 9) ـ أنماط اسلوب عرضي في دليل الموجة الطبقي غير المتناظر .

(4 ـ 4) ـ الاقتران مع دليل الموجة

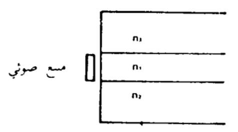
Coupling to the Waveguide

توجد عدة إمكانات من أجل اقتران الضوء بدليل موجة طبقي عازل . سنبحث بتقنيات اقتران الحافة والاقتران الموشوري والاقتران الشعري .

اقتران الحافة Edge Coupling

يبدو من النظرة الاولى ان الاقتران الحافي المباشر (او الاقتران التناكبي butt) كما يوضحه الشكل (4 ـ 10) سهل وفعال . حيث يقرن ثنائي ليزر أو ثنائي باعث للضوء الى حافة الغشاء . تتضح عدة مشاكل من خلال التدقيق القريب . من أجل نقل فعال للضوء من المنبع الى الغشاء يجب ألا تكون منطقة المنبع الباعث اكبر من الغشاء وإلا سيبث المنبع بعضاً من خرجه الى الطبقات غير

الموجهة فيضيع هذا الضوء . وكما رأينا سابقاً يكون لأدلة الموجة الطبقية التي تتحمل فقط بضعة أساليب انتشار ثخانات غشاء من فئة الميكرومتر . وان منبعاً ذا أبعاد تقارب 1 μm سيكون له قدرة خرج صغيرة جداً وذلك لأن امكانية منبع ضوئي لتوليد القدرة تتناسب مع حجمه . .



شكل (4 ـ 10) اقتران حافي مباشر

هناك مشكلة ثانية وتشمل الفرق بين نمط الاشعاع العرضي لمنبع وأنماط الاسلوب لأساليب دليل موجة مسموح لها . يتطلب الاقتران التام أن تكون هذه الأنماط متماثلة أي يجب أن تتواءم . هناك طريقة اخرى في وصف هذه المشكلة وتشمل الأشعة المرتبطة بالأساليب المختلفة . لقد وجدنا ان كل اسلوب مسموح له يطابق موجة مستوية تتعرج خلال الغشاء بزاوية مميزة Θ . ولكي نحرض أي اسلوب خاص نحتاج الى موجة مستوية واردة على الدليل الطبقي بحيث ان الزاوية الداخلية تساوي قيمة Θ المرغوبة كما يبينه الشكل (4 ـ 11) وأن الموجة الواردة تكون في وسط ذي دليل انكسار n_0 . وغالباً ما تكون منطقة الورود هي الهواء $(n_0=1)$. لنجد زاوية الورود $\propto_0$ المطابقة الى الزاوية الداخلية Θ . باستعمال قانون Snell (المعادلة 2 ـ 3) $n_0 \sin \propto_0 = n_1 \sin \propto_1$ ينتج أن :

$$n_0 \sin \propto_0 = n_1 \sin (\pi/2 - \Theta) = n_1 \cos \Theta \qquad (20\text{-}4)$$

إذا تزايدت $\propto_0$ بما فيه الكفاية فستهبط Θ الى ما دون الزاوية الحرجة ولن تنتشر الموجة . تصل $\propto_0$ الى أكبر قيمة لها عندما تساوي Θ قيمة الزاوية الحرجة Θ_c . وعند هذه الزاوية تكون $\sin \Theta = n_2/n_1$ (بافتراض أن $n_2>n_3$) وهكذا يكون $\cos \Theta = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}/n_1$. وبوضع هذه المعادلة في المعادلة (4 ـ 20) نحصل على

فتحة النفوذ العددية Nunmerical Aperture لدليل الموجة وهي 1:

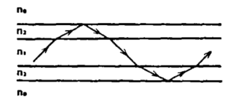
$$NA = n_0 \sin\alpha_0 = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \qquad (21\text{-}4)$$

شكل (4 ـ 11) اتجاهات الشعاع الوارد والشعاع الداخلي

إذا وردت موجة بزاوية أكبر من الزاوية المحددة بهذه المعادلة فسوف لن توجه بواسطة الغشاء . تسمى هذه القيمة العظمى من α_0 بزاوية قبول دليل الموجة . لقد نوقشت في الفقرة (2 ـ 4) فتحة النفوذ التي يمكن تطبيقها عند وصف امكانية تجميع الضوء لأي نظام بصري . إن الثنائيات الباعثة للضوء LED والثنائيات الليزرية تبث ضمن مدى من الزوايا وهذا المدى هو أكبر من زاوية قبول دليل الموجة فيؤدي هذا الى ضياع بعض من القدرة . ويمكن أن يلتقط فقط الضوء الذي يسقط ضمن زاوية القبول . يجب أن نعنى أيضاً بالأشعة الواردة ضمن زاوية القبول التي لا تنتج أشعة في الغشاء عند احدى الزوايا المسموح لها المتمايزة . ان القدرة من هذه الأشعة سترفض ايضاً . يمكن ان نلاحظ ما يلي على أي حال أثناء اشارتنا الى مخطط اسلوب نمطي كالشكل (4 ـ 5) . من أجل قيم صغيرة من الثخانة المقيسة يوجد فقط بضع أساليب ذات زوايا انتشار متباعدة جداً عن بعضها. ويجب أن تتواءم (match) أشعة الورود مع هذه الزوايا من أجل قبولها . في دليل موجة يتحمل عدة أساليب تكون الزوايا المسموحة المتمايزة قريبة جداً من بعضها . يوضح مخطط الاسلوب هذه النتيجة من أجل قيم كبيرة من الثخانات المقيسة . إذا كانت d/λ كبيرة بما فيه الكفاية تكون الزوايا قريبة جداً من بعضها لدرجة أنه تقبل أي زاوية تقع بين Θ_c و 90° . وفي هذه الحالة يلتقط

دليل الموجة كل الضوء الوارد ضمن زاوية القبول . نلاحظ أن فتحة النفوذ العددية تكون مقياساً مفيداً لامكانية تجميع الضوء الزاويّة لأدلّة الموجة ذات الثخانة الكافية من أجل أن تتحمل عدة أساليب وهذا هو حال العديد من الألياف البصرية . من أجل غشاء رقيق تعتمد القدرة المستقبلة على المواءمة بين اتجاهات الشعاع الوارد والأساليب المسموح لها لدليل الموجة . عندما يمكن أن يوجد اسلوب واحد فقط (أو بضع أساليب فقط) تكون المواءمة بين نمط الحقل الوارد ونمط الاسلوب حرجاً في تحديد كفاءة الاقتران . في حالة الأساليب المتعددة بشكل وافر توزّع الطاقة الواردة نفسها بين الأساليب المختلفة .

ان الضوء الذي لم يحجز بواسطة الغشاء لا زال يُلاحَظ في دليل الموجة . تَذَكَّر بأن الأشعة غير المحجوزة لا تعكس 100 ٪ من الضوء بل تعكس بعضاً منه . نلاحظ هذه الأشعة عند تعرجها داخل الغشاء مع تناقص اتساعها باستمرار بسبب الخسارة بالاشعاع التي تحدث عند كل انعكاس . ان لاسلوب الاشعاع هذا اتساع مهمل عند نهاية دليل موجة طويل إلا أنه قد يكون ذا أهمية ضمن مسافة قصيرة بدءاً من نقطة الإثارة . حتى انه قد تحجز بعض الأشعة بسبب انعكاسات الزاوية الحرجة عند حدود الفصل الخارجية لمواد دليل الموجة العليا والسفلى . فمثل هذا الاسلوب الكسائي يوضحه الشكل (4 ـ 12) لدليل موجة طبقي متناظر .



شكل (4 ـ 12) اسلوب كسائي في دليل موجه طبقي متناظر $n_1>n_2>n_0$

مثال :

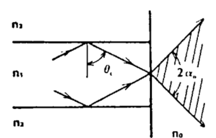
احسب فتحة النفوذ العددية وزاوية القبول من أجل دليل الموجة الطبقي المتناظر Al Ga As حيث $n_1=3.6$ و $n_2=n_3=3.55$ و $n_0=1$.

الحل :

باستعمال المعادلة (4 ـ 21) : $NA = n_o \sin\alpha_o = \sqrt{(3.6^2 - 3.55^2)} = 0.598$

تكون : $\alpha_o = 36.7°$. إن غشاءاً ثخيناً سيقبل كل الضوء الوارد ضمن المدى $\mp 36.7°$.

افترض انه يسمح لدليل الموجة أن يشع في منطقة n_o كما يبينه الشكل (4 ـ 13) تشع الأشعة بزوايا مساوية الى تلك الخاصة بالأشعة الواردة المقبولة . وهكذا من أجل غشاء متعدد الأساليب ومن المعادلة (4 ـ 21) يتحدد المدى الذي من خلاله ستنفذ الأشعة من الطبقة . في المثال الأخير سوف يشع غشاء ثخين ضوءاً ضمن مدى $\mp 36.7°$. وسيشع غشاء رقيق ضوءاً بنمط مطابق لأساليب انتشار متمايزة . يحدد الانعراج التوزع الصحيح لضوء يشعه أي اسلوب .



شكل (4 ـ 13) البث من دليل موجه متعدد الأساليب

نرى من المعادلة (4 ـ 21) أن زاوية قبول كبيرة تشير الى فرق كبير بين n_1 و n_2 علماً أن فرقاً كبيراً في دليل الانكسار يزيد من فعالية تجميع الضوء ويزيد أيضاً عدد الأساليب كما وجدنا من المعادلة (4 ـ 16) .

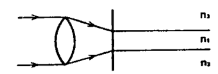
يوجد خسارة أخرى يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار في الاقتران الحافي وهي خسارة الارسال التي تحدث عندما تصدم موجة حداً فاصلاً بين وسطين عازلين . تحسب الخسارة من المعادلة (3 ـ 28) من أجل ورود عمودي . من أجل غشاء ZnS تكون الانعكاسية Reflectance كما يلي :

$$R = (1-2.29)^2 \ / \ (1+2.29)^2 = 0.154$$

فينعكس حوالي 15٪ من الضوء ويبقى 85٪ من القدرة لكي تدخل الغشاء . من أجل غشاء Al Ga As (n_1=3.6) تكون الانعكاسية 0.319 وهكذا ينعكس 32٪ من الضوء . يمكن باستعمال طبقات خارجية مضادة للانعكاس انقاص هذه الخسارات .

بالرغم من الاعتراضات المطروحة قد يكون معقولاً أن نعتبر الاقتران التناكبي من أجل التطبيقات ذات القدرة المنخفضة . إن الميزات هنا هي بساطة التصميم ومتانة البنية النهائية .

يمكن حل المشكلة الناشئة عن كون المنبع (أو الحزمة) أكبر من الغشاء وذلك باستعمال عدسات من أجل إنقاص حجم الحزمة كما في الشكل (4 ـ 14) . من أجل أغشية من فئة 1 μm أو أقل يكون التراصف حرجاً .

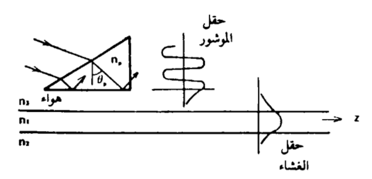


شكل (4 ـ 14) ـ الاقتران الحافي باستعمال عدسة

تستعمل غالباً وسائل معالجة دقيقة في توجيه الحزمة الضوئية والعدسة والغشاء لتحقيق كفاءة اقتران مثلى . تحدث خسارات أخرى عندما لا تكون حافة الغشاء مستوية ونظيفة تماماً وعندما لا يتوافق نمط الحزمة للحقل الوارد على دليل الموجه مع نمط الحقل للأسلوب المنتشر . يبدو في الشكل (4 ـ 14) إن الحزمة الواردة على العدسة تكون متوازية . إن الليزرات الغازية تنتج حزماً تتوازى بسهولة وإن التوزع العرضي للضوء من ليزرات غازية تماثل بدقة حقل الأسلوب TE_0 ذا المرتبة الأدنى وبهذا يمكن تحقيق اقتران ذي فعالية عالية مع دليل موجة وحيد الأسلوب . إن الضوء من ثنائي ليزر يكون ذا مرتبة نوعية أدنى فينتج عن هذا اقتران أضعف مع غشاء وحيد الأسلوب .

الاقتران الموشوري Prism Coupling

إن الاقتران الموشوري (الشكل 4 ـ 15) هو اقتران يشيع استعماله فيخفف من مشاكل التراصف الحرج للاقتران الحافي . وهي طريقة عملية من أجل إدخال الضوء إلى دارة بصرية متكاملة عندما يكون الهواء هو المنطقة فوق غشاء التوجيه . تدخل حزمة ليزرية متوازية الموشور وتخضع لانعكاس الزاوية الحرجة عند القاعدة . وكما نعلم أن هذا ينتج نمط موجة ساكنة في الموشور الذي يسببه التداخل بين الأمواج الواردة والمنعكسة . إضافة لذلك يوجد حقل مضمحل في منطقة الهواء تحت قاعدة الموشور ويبين الشكل هذه الحقول .



شكل (4 ـ 15) ـ اقتران موشوري . المنطقة n_3 هي الهواء .

وكما نعلم أيضاً أن أنماط الحقل لأي من الأساليب المنتشرة في دليل الموجة تمتد إلى منطقة الهواء فوق الغشاء . إذا كانت ثغرة الهواء صغيرة (بحدود نصف طول الموجة أو أقل) يحدث تفاعل بين الحقول المتخامدة للموشور وللغشاء . بمعنى أنه يوجد اقتران بين البنيتين ويؤدي هذا الاقتران إلى تقديم الطاقة من الموشور إلى الغشاء . قد يظهر أنه يستحيل استخراج طاقة اجتازت سطحاً تحدث عليه انعكاسات زاوية حرجة . تذكر على أي حال أن نظرية الانعكاس الكامل تأسست على حد الفصل بين وسطين ممتدين لا نهائياً . وإن توضع دليل الموجه الطبقي قرب قاعدة الموشور يغير الأمر بشكل ضئيل فقط . إن استخراج الطاقة عندما يحدث انعكاس الزاوية الحرجة يدعى الانعكاس الداخلي الكلي اللا مجدي .

من أجل اقتران قوي يجب أن يكون الحقل الذي يضاف إلى الغشاء عند أي نقطة على طول دليل الموجة بنفس طور الموجة الموجودة آنئذٍ . بكلمات أخرى يجب أن يساوي عامل الانتشار الطولي للموجة في الموشور عامل الانتشار الطولي للموجة في الغشاء ويدعى هذا شرط التزامن أو شرط مواءمة الطور (phase matching) وينتج من استعمال المعادلة (4 ـ 3) من أجل الموشور I

$$\beta_p = k_o \; n_p \; \sin \Theta_p$$

ومن أجل الغشاء أن :

$$\beta = k_o \, n_1 \sin \Theta$$

ويكون حينئذ شرط التزامن هو :

$$n_p \sin \Theta_p = n_1 \sin \Theta \qquad (22\text{-}4)$$

إن هذا الشرط يعني ببساطة إن انزياح الطور على طول محور دليل الموجة يبقى ذاته من أجل كل من الأسلوب المنتشر والموجة المغذية له .

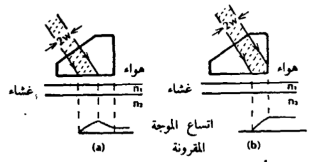
إن للعلاقة في المعادلة (4 ـ 22) نتائج هامة . وإن أي أسلوب خاص له قيمة ثابتة من Θ وحتى نثير هذا الأسلوب يجب أن نضبط Θ_p حتى يتحقق شرط التزامن ويمكن إجراء هذا بسهولة وذلك بتغيير زاوية الحزمة الليزرية الواردة على الموشور . يجب أن يتوافق استقطاب الحزمة الليزرية مع الأسلوب المرغوب . لاحظ أن الاثارة وحيدة الأسلوب تتلاءم بشكل خاص مع الاقتران الموشوري . وإن دليل موجة متعدد الأساليب تاماً ومثاراً بواسطة موشور يحتوي فقط أسلوباً مثاراً وحيداً . إذا كان في دليل الموجة عيوب أو عدم استمرارية يمكن عندئذ أن تتفرق القدرة إلى أساليب مسموح بها أخرى .

لقد رأينا أن Θ_c تكون قريبة من $90°$ عندما يكون لكل من الغشاء والقاعدة أدلّة انكسار متساوية تقريباً . مثلاً : من أجل دليل الموجة Al Ga As الذي نوقش في الفقرة (4 ـ 2) كانت $\Theta_c = 80.4°$. في حالات كهذه يكون $\sin \Theta \approx 1$ في المعادلة (4 ـ 22) وبهذا يكون $n_p = n_1 / \sin \Theta_p$ ويقود هذا إلى الشرط التالي :

$$n_p > n_1 \qquad (23\text{-}4)$$

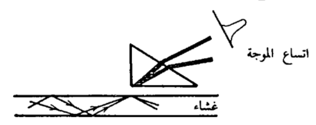
لذلك يجب استعمال مواد ذات أدلّة انكسار عالية في القوارن الموشورية وليس من السهل الحصول على مثل هذه المواد . تستعمل غالباً مادة Rutile التي لها دليل انكسار أكثر من 2 مع الأغشية ذات أدلّة الانكسار المرتفعة بينما تكون مواشير الزجاج الصواني مناسبة من أجل الأغشية ذات الأدلّة المنخفضة كالزجاج . يجب التذكر بأن أدلّة الانكسار لجميع المواد المستعملة في دليل الموجة والموشور تتغير بحسب تغير طول الموجة وهكذا قد يحتاج الأمر إلى اجراء معايرات إذا كان لا بد من التوافق مع المعادلة (4 ـ 22) عند أطوال موجة مختلفة .

يجب وضع حزمة الدخل بشكل صحيح بالنسبة إلى الموشور من أجل كفاءة اقتران عظمى . لنعتبر إثارةً بواسطة ليزر له حزمة غوسيّة ذات حجم بقعة يساوي w . يحتوي الفصل 2 وصفا لحزمة كهذه . ويبين الشكل (4 ـ 16) موقعين ممكنين لحزمة دخل . في الشكل (a-16-4) تنتهي حزمة الدخل قبل أن ينتهي الموشور . لنعتبر المنطقة من الحافة اليمنى للحزمة إلى نهاية الموشور . يوجد عند هذا الطول اقتران من الغشاء رجوعاً إلى الموشور . وإن هذا يخمد الحقل في دليل الموجة كما يشير إليه الشكل وتحدث خسارة في كفاءة الاقتران الكلي ويمكن الحصول على اقتران ذي كفاءة أكبر إذا اقتربت حزمة الدخل أكثر من نهاية الموشور . يحدث الاقتران الأمثل عندما تمتد حزمة الدخل قليلاً إلى ما بعد نهاية الموشور كما يبينه الشكل (b-16-4) . تتلاشى القدرة في حزمة الدخل خلف



شكل (4 ـ 16) ـ تَوضُّع حزمة الدخل لقارن موشوري . في (a) تغذى الطاقة عائدة من الغشاء إلى الموشور . في (b) يتم توضع الحزمة من أجل كفاءة عظمى . ويظهر اتساع الموجة في الغشاء في كلتا الحالتين .

مركزها وهكذا يحدث اقتران قدرة ضعيف جداً إلى الغشاء من الحافة اليمنى للحزمة . في أثناء ذلك يكون الحقل في الغشاء أعظمياً عند الوضع المجاور لدليل الموجة . ويقترن حقل دليل الموجة القوى عائداً إلى الموشور وبعد نقطة ما يتجاوز الاقتران مع الموشور مقدار الاقتران مع الغشاء وهكذا يتم الحصول على الكفاءة المثلى بإنهاء عملية الاقتران قليلاً قبل أن تنهي حزمة الدخل ذاتها . يبلغ الاقتران الأعظمي حوالي 81٪ من أجل الحالة الموصوفة . حيث أن الاقتران بين الغشاء والموشور يكون في الاتجاهين فيمكن استعمال الموشور كقارن خرج كما يوضحه الشكل (4 ـ 17) . لا يزال ينطبق شرط التزامن وهكذا فإن الأساليب ذات الزوايا الداخلية المختلفة تغادر الموشور باتجاهات مختلفة . تسمح هذه الخاصة بالتحديد التجريبي للأساليب الموجودة فعلاً في دليل الموجة . إن عدد حزم الخرج يعطي عدد الأساليب وتشير زوايا الحزمة إلى الأساليب الخاصة . عند إظهار حزم الخرج على شاشة فإنها تشكل خطوطاً تدعى الخطوط m . تتطابق التسمية m مع الرمز المكتوب على دلالة الأسلوب TE_m و TM_m .



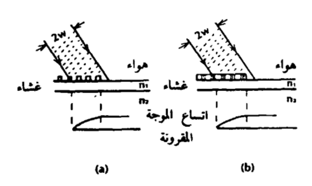
شكل (4 ـ 17) ـ اقتران خرج الموشور. يخرج الأسلوبان المنتشران من الموشور بزوايا مختلفة . يظهر رسم لشكل الحزمة العليا .

يمكن استخراج كل القدرة من دليل الموجة وذلك لأن الاقتران متواصل على طول قاعدة الموشور . وإن المطلب الوحيد هو أن تكون قاعدة الموشور طويلة بما فيه الكفاية . إن شكل الحزمة المغادرة للموشور لن يكون غوسيّاً بل سيكون مشوهاً إلى حد ما كما يبينه الشكل (4 ـ 17) . يخبرنا الفعل التبادلي بأنه إذا وردت حزمة بهذا الشكل على موشور سيكون الاقتران فعالاً 100٪ . إن هذا هو الفرق بين شكل حزمة مثلى وبين الحزمة ذات التناظر الغوسي المتوفرة عادة والتي تحقق اقتراناً أعظمياً لا يزيد عن 81٪ .

الاقتران الشعري Grating Coupling

يوجد عدة مساوىء ظاهرة في الا قتران الموشوري وهي الحاجة إلى مواشير ذات أدلّة انحراف كبيرة واعتمادية طول موجة ضعيف وقد سبق ذكرها . إن الثغرات الهوائية الصغيرة تكون حرجة وقد يصعب بناؤها والمحافظة عليها . وأخيراً إن هذا القارن ليس متكاملاً بذاته . إن القارن المفضل هو الذي يتلاءم مع بنية بصرية متكاملة وذو شكل مسطح ويمكن بناؤه مباشرة على طبقة تحتية بصرية متكاملة . إن هذا القارن هو المسمى الشعري العازل والمبين على الشكل (4 ـ 18) .

يبدو على الشكل (a-18-4) صفيف (array) قضبان عازلة تتكرر دورياً فتشكل شعريةً بينما يبدو على الشكل (b-18-4) شعريةً طوريةً تتألف من طبقة عازلة ذات تغير في دليل الانكسار يتكرر دورياً . يمكن أن تتشكل الشعرية القضيبية بأن تتعرض مقاومة ضوئية ثخينة إلى ضوء دوري وأن تحفر المناطق غير المعرضة . إن المنظر الجانبي للشعريات الذي يبين كمستطيل يمكن أن يظهر بالواقع شكلاً جيبياً أو مثلثياً أو أي شكل آخر . يمكن أن تتشكل الشعرية الطورية بأن تتعرض طبقة من هلام ثنائي اللون إلى نمط ضوئي دوري . إن هذا ينتج تغيراً دورياً في دليل الانكسار .



شكل (4 ـ 18) ـ قوارن شعرية . (a) صفيف عازل دوري و (b) طبقة عازلة ذات تغير دوري في دليل الانكسار .

تحرف الشعريةُ الحزمة الواردة إلى واحدة أو أكثر من الأمواج النافذة . إذا كان لإحدى هذه الأمواج عامل انتشار طولي مساوٍ إلى ذلك الخاص بأسلوب

الانتشار فيحدث الاقتران وتتم إثارة ذلك الأسلوب . إن متطلبات تعيين موقع الحزمة الواردة هي ذاتها المطلوبة من أجل القارن الموشوري . يبين الشكل (4 ـ 18) تجاوز الحزمة الخفيف المطلوب من أجل أعلى كفاءة . وأيضاً تكون الكفاءة العظمى 81٪ من أجل حزمة غوسيّة متناظرة .

يمكن إجراء تعديلات وتغييرات في القوارن الشعرية والموشورية والحافية . هناك أنواع أخرى من الاقتران مهمة أيضاً في تطبيقات البصريات المتكاملة وهي الاقتران مباشرة من ليف والاقتران بين دارتين متكاملتين منفصلتين والاقتران بين أغشية متجاورة على نفس القاعدة .

(4 ـ 5) ـ التشتت والتشوه في دليل الموجه الطبقي
Dispersion and Distortion in the Slab Waveguide

لقد وجدنا في الفقرة (3 ـ 2) أنه يحدث انبساط (تشوه) لشكل موجة تنتشر خلال وسط ذي دليل انكسار يتغير مع طول الموجة . ويحدث انبساط نبضة في أي بنية عازلة تحتوي مادة مشتتة . يوجد مصدران إضافيـان للتشـوه في أدلّة الموجة مثل التشتت والتشوه متعدد الأساليب للدليل ذي الطبقة العازلة وللدليل الليفي البصري .

تشتيت دليل الموجة Waveguide Dispersion

يبين الشكل (4 ـ 5) إن دليل الانكسار الفعال لأي أسلوب يتغير مع طول الموجة من أجل ثخانة غشاء ثابتة حتى ولو كانت مواد الغشاء والطبقة التحتية غير مشتتة . وهذا هو تشتيت دليل الموجة . يسبب التغير في n_{eff} انبساط النبضة تماماً كما يفعله تغير n . وكما هو الحال عادة عندما تكون مواد دليل الموجة مشتتة يتواجد في آن واحد تشتيت المادة ودليل الموجة معاً .

إن مقدار انبساط النبضة الذي يسببه دليل الموجة يتبع نفس المعادلة التي تخص تشتيت المادة بوضع دليل الانكسار الفعال بدلاً من دليل انكسار المادة وبالإشارة إلى المعادلة (3 ـ 14) نحصل على ما يلي من أجل تشتيت المادة :

$$\Delta (\tau/L) = - \frac{\lambda}{c} n''_{eff} \Delta\lambda = - M' \Delta\lambda \qquad (24\text{-}4)$$

إن $\Delta\lambda$ في هذه المعادلة هي خط عرض المنبع (Source linewidth) وان $n''_{eff}=d^2 n_{eff}/d\lambda^2$ و $M'=\lambda n''_{eff}/c$. يمكن الحصول على هذا الحد الأخير من مخططات الأسلوب وذلك برسم ميول n_{eff} مثل n'' في المعادلة (3 ـ 13) التي أوجدت من منحنيات دليل الانكسار . سوف لن نحصل على نتائج عددية من أجل تشتيت دليل الموجة في الدليل الطبقي . إن هدفنا الرئيسي من دراسة هذا الموضوع هو أن نفهم الظاهرة المطروحة لأنها تحدث ولأنها مهمة في الألياف البصرية .

التشوه متعدد الأساليب Multimode Distortion

عندما تنتشر عدة أساليب في دليل طبقي فإنها تنتشر بسرعات صافية مختلفة بالنسبة لمحور دليل الموجة . من المؤكد أن شكل موجة دخل ما ستتشوه خلال انتشارها إذا توزعت طاقتها على عدة أساليب ينتشر كل منها بسرعة مختلفة . حيث تصل أجزاء من الموجة إلى المخرج قبل الأجزاء الأخرى مما يؤدي إلى انبساط شكل الموجة . وهذا هو التشوه متعدد الأساليب أو التشوه الظاهري Modal Distortion . ومع أنه يدعى غالباً التشتيت متعدد الأساليب فمن المفضل استعمال التشتيت فقط عند الإشارة إلى ظاهرة الاعتمادية على طول الموجة . من المهم جداً أن ندرك أن التشوه متعدد الأساليب لا يعتمد على عرض خط المنبع . إن نبضة من منبع وحيد التردد تام ($\Delta\lambda=0$) سوف تعاني من الانبساط المتعدد الأساليب بينما سيساوي صفراً كل من انبساط دليل الموجة والمادة . بالطبع سوف لن يحدث التشوه متعدد الأساليب إذا كان دليل الموجة يسمح فقط بانتشار أسلوب واحد . وهذه هي ميزة أدلة الموجة وحيدة الأسلوب .

يمكن بسهولة تعيين مقدار الانبساط الظاهري من أجل دليل طبقي عازل . نوجد فقط الفرق في زمن المسير بين أسلوب منتشر على امتداد محور دليل الموجة وبين أسلوب منتشر على الزاوية الأكثر انحداراً بالنسبة لمحور الدليل . سيكون لهذا الأسلوب الأخير أشعة عند الزاوية الحرجة وسيصل الأسلوب

المحوري نهاية دليل الموجة أولاً . باعتبار دليل موجة محوري طوله L يكون زمن المسير المحوري L/v أو :

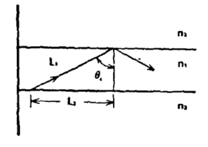
$$t_a = \frac{L}{c} n_1 \qquad (25\text{-}4)$$

سيصل شعاع الزاوية الحرجة في الأخير من بين الأساليب المتعددة لأنه ينتشر وفق المسار الأطول متعرجاً ذهاباً وإياباً في دليل الموجة . بالإشارة إلى الشكل (4 ـ 19) تكون المسافة الكلية التي يقطعها الشعاع هي Ln_1/n_2 . وينتشر على مسار شعاع بسرعة هي $v=c/n_1$ ويكون زمن مسيره هو :

$$t_c = \frac{L}{cn_2} n_1^2 \qquad (26\text{-}4)$$

ويكون حينئذ انبساط النبضة لكل واحدة طول $(t_c-t_a)/L$ كما يلي :

$$\Delta(\tau/L) = \frac{n_1(n_1-n_2)}{cn_2} \qquad (27\text{-}4)$$



شكل (4 ـ 19) ـ يسير شعاع الزاوية الحرجة مسافة : $L_1=L_2/\sin\Theta_c$ من أجل أن يجتاز مسافة محورية L_2 . وحيث أن $\sin\Theta_c=n_2/n_1$ يكون $L_1=L_2\, n_1/n_2$. يكون مسار الشعاع الكلي لدليل موجة طوله L حينئذ $L\, n_1/n_2$.

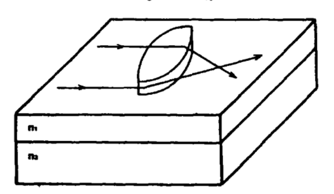
في دليل موجة متعدد الأساليب توجد في آن واحد جميع آليات الانبساط النبضي الثلاثة معاً : تشتيت المادة وتشتيت دليل الموجة والتشوه متعدد الأساليب سنؤجل التقييم العددي لهذه الظواهر وتفاعلاتها إلى ما بعد أن نكون قد بحثنا خواص الانتشار للألياف البصرية مباشرة . يجب أن نذكر على أي حال أنه

بسبب ازدياد التشوه وفقاً لطول المسار وحيث أن دارات البصريات المتكاملة تكون عادة قصيرة فعلاً فإن التشوه في البصريات المتكاملة ليس بالمشكلة الكبيرة كما هو الحال في الألياف (التي يمكن أن يبلغ طولها عدة كيلومترات) وعلى أي حال إن دراسة التشوه تكون أسهل في الصيغ البصرية المتكاملة مما هي في الألياف الأسطوانية .

(4 ـ 6) ـ الشبكات البصرية المتكاملة

Integrated Optic Networks

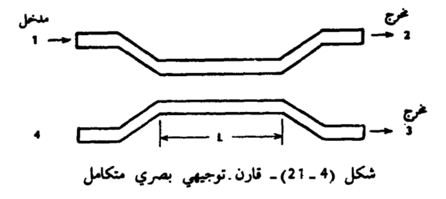
تستعمل الشبكات البصرية المتكاملة كلا من المركبات الفعالة وغير الفعالة . تشمل الأجهزة الفعالة قوارن توجيهية وعوازل ومراشيح وعدسات ومواشير . تعمل القوارن التوجيهية على توصيل أدلّة الموجة ذات الأغشية الرقيقة المتجاورة . أما العوازل فهي خطوط إرسال باتجاه واحد ترفض الضوء المنعكس الذي يمكن أن يفسد عمل المنبع الضوئي ويتم إنشاء الأجهزة غير الفعالة عموماً بالتغيير البسيط لبنية دليل الموجة . وكما يمكن أن نلاحظ من مخطط الأسلوب يؤدي تغيير ثخانة الغشاء إلى تغيير دليل الانكسار الفعال . لذلك تسبب تغيرات الثخانة إلى انحرافات الشعاع بموجب قانون Snell . يبين الشكل (4 ـ 20) عدسة بصرية متكاملة مشكلة بهذه الطريقة .



شكل (4 ـ 20) ـ عدسة بصرية متكاملة

يبين الشكل (4 ـ 21) قارناً توجيهياً غير فعال يوجه بعضاً من ضوء الدخل إلى البوابة 2 وبعض الضوء إلى البوابة 3 . ومن الناحية المثالية لا يصل

أي ضوء إلى البوابة 4 . إن النسبة المئوية من الضوء المقترن بدليل الموجة المجاور يمكن أن تتغير من 0٪ إلى 100٪ وذلك بتغيير الطول L لمنطقة الاقتران . يحدث الاقتران ما بين أدلّة الموجة المتجاورة بسبب تراكب حقولها المضمحلة وهذه هي نفس الظاهرة كما في الاقتران الموشوري . وكما هو الحال في الدليل الموشوري يتطلب الاقتران الفعال أن يكون عامل الانتشار هو ذاته لكل دليل موجة وهذا هو شرط المواءمة الطورية . وهذا محقق من أجل الأدلّة المتماثلة وذلك لأن لها نفس دليل الانكسار الفعال .

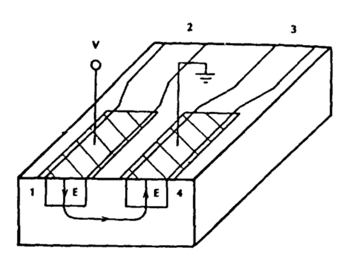


شكل (4 ـ 21) ـ قارن توجيهي بصري متكامل

يمكن فصل الأجهزة الفعالة إلى فئتين : تلك التي تتحكم بالضوء وتلك التي تحول الضوء . تشمل الفئة الأولى أجهزة تبديل الحزمة والانحراف والمسح وتعديل الضوء . وتتألف الفئة الثانية من منابع (التي تحول الكهرباء إلى ضوء) ومكاشيف ضوئية (التي تحول الضوء إلى كهرباء) .

تعتمد أجهزة التحكم الفعالة على توفر المواد التي تكون من نوع كهربصرية أو صوت بصرية . تغير المواد الكهربصرية أدلّة انكسارها وفق حقل كهربائي مطبق وتعتمد المركبات الصوت بصرية على التفاعل بين موجة صوتية مهيجة كهرضغطياً على سطح دليل الموجة والحزمة الضوئية . إن جميع وظائف التحكم الفعالة يمكن انتاجها إما كهربصرياً أو صوت بصرياً .

إن المفتاح الكهربصري المبين في الشكل (4 ـ 22) يشبه القارن التوجيهي المبين في الشكل (4 ـ 21) . من أجل المفتاح يجب أن يكون للغشاء أثر كهربصري قوي ويعتبر Lithium niobate مناسباً لهذه الغاية . يبدو على الشكل

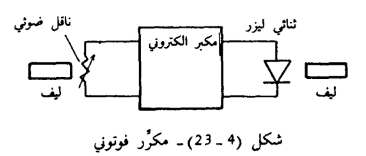


شكل (4 ـ 22) ـ مفتاح كهربصري

(4 ـ 22) أن أدلة الموجة تحضنها الطبقة التحتية وهذه هي بنية شائعة يمكن الحصول عليها بنثر التيتانيوم في الطبقة التحتية Li Nb O_3 من أجل إنتاج منطقة ذات دليل انكسار أعلى . توضع الأقطاب على قمة دليل الموجة كما يبينه التظليل المهشر على الشكل . يمكن ضبط طول الاقتران بحيث أن كل الضوء ينقل إلى الدليل الثاني عند عدم تطبيق جهد . في هذه الحالة يكون دليلا الموجة المتماثلان متوائمين بالطور . وعند تطبيق جهد تسبب الحقول الكهربائية الناتجة تغير دليلي الانكسار لكلا الدليلين . إن هذا التغير يكون في اتجاهين متعاكسين بالنسبة للأغشية الموجِّهة وذلك لأن الحقل الكهربائي المطبق يتوجه بشكل متعاكس فيهما كما يشير إليه الشكل . ويصبح دليلا الانكسار لدليلي الموجة غير متساويين مما يبطل شرط المواءمة الطورية وينقص الاقتران المتقاطع إلى الصفر وسيتابع كل الضوء الآن على طول دليل موجة الدخل .

يمكن للمفتاح في الشكل (4 ـ 22) أن يعمل أيضاً كمعدِّل . يتم التحكم في الشدة الضوئية في القناة الأخرى بواسطة الجهد المطبق . إن المعدِّلات والمفاتيح التي تكون خارجية بالنسبة للمنبع تكون مهمة لعدة أسباب . يمكن انتاج التعديل خارجياً بترددات أعلى مما يمكن الحصول عليه بالتعديل المباشر للثنائيات الباعثة للضوء ولثنائيات الليزر . إن عروض نطاق تبلغ بضعة Gigaherz تكون ممكنة بالمعدِّلات البصرية المتكاملة .

يمكن إنشاء الدارات البصرية المتكاملة باستعمال طبقات تحتية وأغشية من أنصاف النواقل . تقدم المواد نصف الناقلة فرصة تجميع منابع بصرية ومكاشيف بصرية ودارات الكترونية على طبقة تحتيةٍ واحدة . هناك تطبيق لهذا المبدأ وهو المكرِّر الفوتوني الذي تظهر عناصره على الشكل (4 ـ 23) . يمكن لهذا النظام أن يأخذ الشكل التكاملي التالي : طبقة تحتية Ga As ومكشاف توصيل ضوئي



شكل (4 ـ 23) ـ مكرِّر فوتوني

و Ga As MESFET (ترانزستورات أنصاف نواقل معدنية ذات الأثر الحقلي) لإنجاز جميع الوظائف الالكترونية ومنبع ضوئي ثنائي ليزر Al Ga As . عند التشغيل تنبعث من الليف إشارة بصرية ضعيفة السوية وتضيء الموصل الضوئي فتغير مقاومته . وحيث أن الموصل الضوئي يخضع لجهد ثابت فإن تياره سيتغير تبعاً للتعديل البصري . عند هذه النقطة تكون الاشارة البصرية قد تحولت إلى اشارة كهربائية . تكبر الإشارة الكهربائية ويستعمل التيار المقوى في تعديل ثنائي ليزري . ويقرن أخيراً خرج الليزر الى ليف من أجل إرسال أبعد . يتميز هذا النوع من الأنظمة المتكاملة بالمتانة وسهولة التوصيل إلى شبكة أكبر والاقتصادية إذا أنتج بكميات كبيرة .

(4 ـ 7) ـ الخلاصة :

لقد غطى هذا الفصل موضوعين أوليين وهما البصريات المتكاملة والانتشار في دليل الموجة الذي يشبه إلى حد كبير ليفاً بصرياً . لقد تطرقنا باختصار شديد إلى التكنولوجيا البصرية المتكاملة ذات الغشاء الرقيق فعرضنا فقط بعضاً من المفاهيم الأساسية . وقد أوضحنا المركبات الفعالة وغير الفعالة المفيدة في أنظمة الاتصالات البصرية إضافة إلى شبكة كاملة وهي المكرِّر الفوتوني .

لقد حددنا ما يلي من أجل دليل موجة طبقي عازل :

1 ـ توجّه الأمواج بواسطة انعكاسات الزاوية الحرجة .

2 ـ تفرض الأمواج شكل الأساليب ويطابق كل أسلوب اتجاهاً خاصاً لمسير شعاع وله نمط حقل عرضي وحيد .

3 ـ إن الأساليب هي طنين دليل الموجة من أجل اتجاهات شعاع مائلة بالنسبة للعمود على حد الفصل .

4 ـ يمكن إيجاد دليل الانكسار الفعال من مخطط الأسلوب . ويتم الحصول على عامل الانتشار الطولي مباشرة من n_{eff} باستعمال المعادلة (4 ـ 7) .

5 ـ يوجد استقطابان متعامدان يسميان الأسلوب المغناطيسي العرضي والأسلوب الكهربائي العرضي .

6 ـ يزداد عدد الأساليب المسموح لها تبعاً لثخانة الغشاء وتبعاً للفرق في أدلّة الانكسار بين الغشاء الموجِّه وما يحيط به .

7 ـ من أجل غشاء رقيق لدرجة كافية يمكن أن يتحمل دليل الموجة أسلوباً وحيداً فقط .

8 ـ يزداد عرض النبضة نتيجة تشتيت المادة وتشتيت دليل الموجة والتشوه متعدد الأساليب . تتزايد الظاهرتان الأوليتان وفق عرض خط المنبع . ولا يعتمد التشوه متعدد الأساليب على عرض خط المنبع ويزداد تبعاً للفرق في دليل الانكسار (n_1-n_2) .

9 ـ يمكن أن يقترن الضوء حافياً فقط إذ توجه ضمن مدى من الزوايا المحددة بفتحة النفوذ العددية لدليل الموجة . يزداد NA بحسب الفرق في دليل الانكسار .

إن معظم النتائج التي حصلنا عليها بتحليل دليل الموجة الطبقي المتناظر تنطبق مباشرة على الليف البصري . سنستعمل هذه المعلومات في الفصل التالي الذي يغطي الألياف بشكل واضح . وحيث أنها ستظهر ثانية فسوف لن نكرر في هذا الموجز المعادلات المهمة التي قدمت في هذا الفصل . تتشابه كثيراً كل من الطبقة المتناظرة والليف البصري لدرجة أن القارىء يعرف مقداراً مهماً عن الانتشار في الليف حتى قبل أن يعرض رسمياً .

مسائل الفصل الرابع

4 ـ 1 ـ في دليل الموجة Al Ga As في الفقرة (4 ـ 2) ليكن طول الموجة $\lambda=0.82\ \mu m$ و $\Theta=85°$. ارسم بيانياً اتساع القمة للحقل الكهربائي للأسلوب TE_0 كتابع لمحور الاحداثيات العرضي y . واحسب ثخانة الغشاء واحسب قيمة n_{eff} . استعمل المعادلة (3 ـ 33) من أجل الأضمحلال خارج الغشاء .

4 ـ 2 ـ أوجد مخطط أسلوب مثل ذلك المبين في الشكل (4 ـ 5) إذا كان : $n_1=1.48$ و $n_2=n_3=1.46$.

4 ـ 3 ـ ما هي ثخانة الغشاء العظمى إذا سمح بأسلوب TE واحد فقط في دليل الموجة للمسألة (4 ـ 2) ؟ وكان طول الموجة : $\lambda=0.82\ \mu m$.

4 ـ 4 ـ كم عدد أساليب TE التي يمكن ان تنتشر في دليل الموجة الطبقي المتناظر Al Ga As في الفقرة (4 ـ 2) إذا كان d/λ يساوي 5 و 10 و 100 .

4 ـ 5 ـ حدّد ثخانة الغشاء عند القطع للأساليب TE_0 و TE_1 و TE_2 و TE_3 بافتراض ان : $n_1=1.48$ و $n_2=n_3=1.46$ و $\lambda=0.82\ \mu m$. ارسم بيانياً أنماط الأسلوب العرضي عند القطع لكل واحد من هذه الأنماط .

4 ـ 6 ـ في الدليل الطبقي في المسألة (4 ـ 2) احسب ثخانة غشاء بحيث ان الأسلوب TE الوحيد المنتشر هو الأسلوب TE_0 عند $\lambda=1.3\ \mu m$ وبحيث ينتشر كلا الأسلوبين TE_0 و TE_1 عند $\lambda=0.82\ \mu m$. أهمل الأساليب TM .

4 ـ 7 ـ برهن المعادلة (4 ـ 14) .

4 ـ 8 ـ بيِّن ان فتحة النفوذ العددية (NA) لدليل الموجة الطبقي المتناظر تساوي $n_1\sqrt{2\Delta}$ إذا كان n_1 يساوي تقريباً n_2 و Δ هو التغير الجزئي لدليل الانكسار .

4 ـ 9 ـ في دليل الموجة الطبقي العازل : $n_1=1.48$ و $n_2=1.46$ والدليل محاط بالهواء . ارسم مسار الشعاع لأسلوب كسائي إذا كانت : $\Theta=75°$ (Θ هي الزاوية في الغشاء) . وعند أي قيم لـ Θ تختفي الأساليب الكسائية .

4 ـ 10 ـ اعتبر الدليل الموجي Al Ga As في الفقرة (4 ـ 2) حيث : $\lambda=0.82\ \mu m$ و $d/\lambda=10$. يثار دليل الموجة هذا بحزمة ليزرية ذات قطر مقداره 1 mm تُبأَّر على الحافة . صمم ترتيبات الاقتران .

4 ـ 11 ـ برهن ان المعادلة (4 ـ 21) تنبىء بزاوية نفاذ عظمى للأشعة المغادرة لدليل موجة طبقي متناظر .

المراجع

الفصل الرابع

1. Rod C. Alferness. "Guided-Wave Devices for Optical Communication." *IEEE J.Quantum Electron* 17, no. 6 (June 1981): 946-59.
2. W. S. C. Chang, M. W. Muller, and F. J. Rosenbaum. "Integrated Optics." In *Laser Applications,* edited by Monte Ross. New York: Academic Press, Inc., 1974. pp. 269-89.
3. W. S. C. Chang. *Laser Applications.* pp. 289-334.

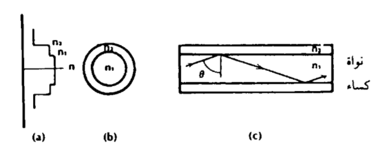
الفصل الخامس

الأدلة الموجية الليفية البصرية
Optic Fiber Waveguides

نحن الآن مهيئون لتقديم البند الرئيسي في نظام اتصالاتنا وهو الليف البصري . مع أن بعضكم فقط سيُصمِّم ويصنع أليافه الخاصة به فإنه يتوجب الحصول على بعض الأفكار عن كيفية إنجاز ذلك. يتطلب الاختيار الملائم والاستخدام الملائم فهماً عميقاً لتركيب الليف ومميزاته . وبتذكرنا هذا سندرس الأنواع الرئيسية للألياف وخصائص انتشار الأمواج خلالها . وسنبذل اهتماماً خاصاً للتخامد والأساليب وسعة المعلومات . وسنناقش أيضاً بناء وتصميم الألياف والكابلات الليفية .

(5 ـ 1) ـ الليف ذو الدليل الدرجي Step-Index Fiber (SI)

يتألف الليف ذو الدليل الدرجي (SI) من نواة مركزية ذات دليل انكسار n_1 يحيط بها كساء ذو دليل انكسار n_2 وهذا ما يبينه الشكل (5 ـ 1) . وكما هو الحال في الدليل الموجي الطبقي العازل يتطلب التوجيه الكامل أن تكون زاوية



شكل (5 ـ 1) ـ ليف ذو الدليل الدرجي . (a) مظهر جانبي لدليل الانكسار و (b) مظهر طرفي و (c) مظهر مقطع جانبي .

الانكسار Θ مساوية للزاوية الحرجة Θ_c أو أكبر منها . تعطى الزاوية الحرجة لليف SI بالعلاقة التالية :

$$\sin \Theta_c = \frac{n_2}{n_1} \qquad (1\text{-}5)$$

يعطى معير دليل الانكسار الجزئي Δ الذي هو معلمة ليفية هامة بالعلاقة التالية :

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \qquad (2\text{-}5)$$

إن هذه المعلمة موجبة دائماً وذلك لأن n_1 يجب أن تكون أكبر من n_2 حتى يكون هناك زاوية حرجة . تبلغ قيمة Δ النموذجية بحدود 0.01 .

يتطلب الإرسال الفعال أن تكون النواة والكساء عديمي الخسارة قدر الإمكان . مع أن مخطط الشعاع يفرض أن ينتشر الضوء كلياً ضمن النواة إلا أنه ليست هذه هي الحال بالضبط . في الواقع ينتشر بعض الضوء في الكساء بشكل موجة مضمحلة كما تمت مناقشته في الفصل الرابع من أجل دليل موجي طبقي . فإذا كان الكساء غير ماص فلن يفقد هذا الضوء بل سينتشر في الليف . تتلاشى الحقول المضمحلة بسرعة وهكذا لن يصل أي ضوء إلى حافة الكساء إذا كانت ثخانته بضع عشرات من الميكرونات .

هنا يظهر التساؤل عن مدى الحاجة إلى كساء . إن نواة من الزجاج محاطة بالهواء تحقق المطلب وهو $n_1 > n_2$ وستقوم بالفعل بتوجيه موجة ضوئية . على أي حال تظهر مشاكل قاسية عندما نحاول أن نتعامل أو ندعّم هذا النوع من البنى . إن أيِ مادة فاقدة ملحقة بالنواة من أجل دعمها ستسبب خسارات في الموجة

المنتشرة . وإن نواة من غير كساء يمكن أن تنثني أو تنخدش بسهولة مما يسبب خسارات إضافية . إن الكساء يحمي النواة من التلوث ويساعد في الحفاظ على سلامتها العضوية .

إن للألياف ذات الدليل الدرجي ثلاثة أشكال شائعة : نواة زجاجية مكسوة بزجاج ذي دليل انكسار أصغر بقليل ونواة من زجاج سيليكا مكسوة ببلاستيك ونواة بلاستيكية مكسوة ببلاستيك آخر . عموماً فإن درجة دليل الإنكسار تكون الأصغر للألياف التي تتكون كلياً من الزجاج وتكون أكبر بقليل للألياف المكونة من السيليكا والمكسوة بالبلاستيك (PCS) وتكون الأكبر من أجل البنى المكونة كلياً من البلاستيك . يعود هذا إلى المدى المحدود من أدلّة الانكسار المتوفرة لأنواع الزجاج وإلى المدى الأعلى بقليل لأنواع البلاستيك . وكما هو الحال بالنسبة للدليل الموجي الطبقي يتزايد التشوه الظاهري وفتحة النفوذ العددية تبعاً للفرق في دليل الإنكسار (n_1-n_2) . وبسبب هذا يكون كل من انبساط النبضة الظاهري والـ (NA) صغيرين للألياف المكونة كلياً من الزجاج وأكبر منهما لألياف PCS وذا قيمة أكبر للبنى المكونة كلياً من البلاستيك . تملك الألياف ذات انبساط النبضة الصغير قيمة جداء (طول × معدل) كبيرة . ويكون NA لهذه الألياف صغيراً مما يجعل الاقتران الفعال للضوء إليها صعباً .

إن خسارة التخامد في الألياف المكونة كلياً من الزجاج هي على العموم أقل من الخسارة في الألياف PCS أو في الألياف المكونة كلياً من البلاستيك . تتوفر ألياف مكونة كلياً من الزجاج ذات خسارات تبلغ بحدود بضعة dB/km أو أقل وتبلغ خسارات ألياف PCS بحدود الـ 8 dB/km وتصل خسارات الألياف المكونة كلياً من البلاستيك إلى بضعة مئات من الـ dB/km .

من معلومات الفقرة السابقة يمكن أن نُكوّن عدداً من الاستنتاجات فيما يخص الإنجاز والتطبيق للأنواع الثلاثة من ألياف الـ SI . إن العرض التالي ينطبق على الألياف التي تكون كبيرة بما فيه الكفاية لكي تتحمل عدة أساليب :

1 ـ إن للألياف المكونة كلياً من الزجاج أقل خسارات وأصغر انبساط نبضة ظاهري . بسبب هذه الخصائص تفيد هذه الألياف من أجل معدلات

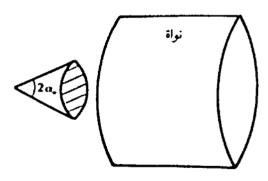
عالية نوعاً ما من المعلومات أو من أجل مسافات طويلة إلى حد ما ويمكن تحقيق حاصل جداء 30 MHz×km . إن قيمة NA (فتحة النفوذ العددية) المنخفضة لليف SI زجاجي تنتج خسارات كبيرة عند الاقتران بمنبع ضوئي وتعوض خسارة الارسال المنخفضة هذه المشكلة جزئياً . إن الأقطار النموذجية للنوى تبلغ 50 μm و 100 μm و 200 μm .

2 ـ حيث أن ألياف PCS ذات خسارات أكبر وانبساطات نبضة أكبر من الألياف المكونة كلياً من الزجاج فإنها تصلح لوصلات أقصر . تؤدي فتحات نفوذها العددية الأكبر إلى زيادة كفاءة الاقتران بالمنبع إلا أن هذه الميزة تفقد في الليف الطويل بسبب الامتصاص المتزايد . تصلح عادة ألياف PCS عندما تكون أطوال المسارات أقل من بضعة مئات من الأمتار وأن أقطار نوى من فئة 200 μm تكون نموذجية لهذه الألياف . يحسّن قطر النواة الكبير كفاءة الاقتران بالمنبع .

3 ـ تستعمل الألياف المكونة كلياً من البلاستيك للمسافات القصيرة جداً فقط وذلك بسبب خسارات الانتشار العالية فيها . وتكون أطوال مساراتها عادة أقل من بضعة عشرات من الأمتار . تجعل النوى الكبيرة وفتحات النفوذ الكبيرة الألياف البلاستيكية صالحة للاستعمال بسبب كفاءات الاقتران العالية الناتجة . إن أقطار نوى بحجم 1 mm تكون نموذجية .

إن فتحات النفوذ العددية وزوايا القبول للألياف الممثّلة للتركيبات المكونة كلياً من الزجاج و PCS والبلاستيك تعطى في الجدول (5 ـ 1) . وقد حسبت فتحات النفوذ العددية وزوايا القبول من المعادلة (4 ـ 21) :

$NA = \sin\alpha_o = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}$ بافتراض أن الهواء يحيط بطرف مدخل الليف . سيلتقط الليف فقط الأشعة المنبعثة ضمن مخروط ذي زاوية كلية مقدارها $2\alpha_o$ كما يبينه الشكل (5 ـ 2) . تبث الثنائيات الليزرية و LED النموذجية ضمن مدى زاوي كبير وغالباً أكبر من زوايا القبول في الجدول (5 ـ 1) . تبين النتائج العددية في الجدول (5 ـ 1) الميزة الواضحة لليف ذي NA أكبر من أجل تجميع ضوء محسن .



شكل (5 ـ 2) ـ مخروط القبول من أجل التقاط ضوء بواسطة ليف ذي دليل درجي .

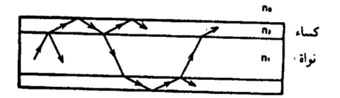
جدول (5 ـ 1) ـ فتحات نفوذ عددية وزوايا قبول نموذجية

التركيب	n_1	n_2	NA	α_o
كله من الزجاج	1.48	1.46	0.24	13.9°
PCS	1.46	1.4	0.41	24.2°
كله من البلاستيك	1.49	1.39	0.53	32°

إن نظرة إلى البنية ذات الدليل الدرجي تشير إلى أنه يمكن أيضاً التقاط الضوء بالانعكاس الداخلي الكلي عند حد الفصل الخارجي للكساء إذا كانت المادة التي تحيط بالكساء ذات دليل انكسار أصغر من دليل انكسار الكساء نفسه . يبين الشكل (5 ـ 3) مسارات الشعاع الممكنة . في المثال المبين تكون زاوية الشعاع عند السطح البيني للنواة والكساء أقل من الزاوية الحرجة وهكذا يتم إرسال بعض الضوء إلى الكساء . يصدم هذا الضوء السطح الخارجي للكساء بزاوية أكبر من الزاوية الحرجة لذلك الحد الفاصل وينعكس كلياً عائداً نحو محور الليف . إن الضوء الذي يمثله هذا الشعاع لن يغادر الليف أبداً وسيوجه بواسطة هذا الليف . يوضح هذا المثال وجود الأساليب الكسائية التي تتميز بأشعة تنتشر وفق مسارات تقطع محور الليف بزوايا أكبر من تلك الخاصة

بالأساليب الموجهة بواسطة النواة . تثار هذه الأساليب بالضوء الداخل في نهاية الليف بزوايا أكبر من زاوية القبول وتبدأ أيضاً عند حدود اللا استمرارية مثل الوصلات والموصلات حيث يمكن أن ينحرف الضوء بزوايا أكبر من زوايا أسلوب النواة .

يتخامد الضوء المنتشر في أسلوب كسائي بسرعة أكبر من الضوء في أسلوب النواة وذلك لأن حد الفصل الخارجي للكساء يكون عادة على تماس مع مادة ذات خسارة . بالإضافة إلى ذلك فإن الانحناءات الصغيرة في الليف تنقص زاوية الشعاع إلى ما دون زاوية الانكسار الكلي فتسبب خسارات إشعاع . غالباً ما نلاحظ قدرة في أساليب كسائية عند نقاط قريبة من المنبع الضوئي . تتخامد هذه القدرة بسرعة لدرجة أن الأساليب الكسائية تكون ضئيلة عند نهاية ليف طويل .



شكل (5 ـ 3) ـ مسارات الشعاع لأساليب كسائية . يوجد عند السطح البيني للنواة والكساء انعكاس جزئي يظهر مسارات الشعاع المتعددة .

مثال :

افترض ليفاً زجاجياً في الجدول (5 ـ 1) محاطاً بالهواء . أحسب الزاوية الحرجة عند حد الفصل بين النواة والكساء الهوائي .

الحل :

باستعمال معادلة الزاوية الحرجة مرة ثانية نجد أن : $\Theta_c=\sin^{-1}(1/1.46)=43°$. يجب أن يقارن هذا بأسلوب النواة حيث : $\Theta_c=\sin^{-1}(1.46/1.48)=80.6°$. نذكّر أن Θ هي زاوية الشعاع مقاسة اعتباراً من

العمود على حد الفصل ويمكن أن نرى كيف تنتشر أشعة الأسلوب الكسائي يميل أكبر بكثير من أشعة أسلوب النواة بالنسبة لمحور الليف .

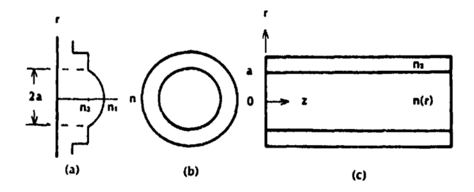
(5 ـ 2) ـ الليف ذو الدليل المتدرِّج

Graded-Index Fiber (GRIN)

يملك الليف ذو الدليل المتدرج GRIN مادة نواة ذات دليل انكسار يتغير تبعاً للبعد عن محور الليف . إن هذه البنية المبينة في الشكل (5 ـ 4) تبدو مختلفة تماماً عن الليف SI . سنبين كيف يوجه ليف GRIN الضوء بالتقاطه للأشعة ولا يختلف عن عمل دليل موجي SI . يوصف تغير دليل الإنكسار بما يلي :

$$n(r) = n_1\sqrt{[1-2(r/a)^{\alpha}\Delta]} \qquad r \leq a \qquad (a\text{-}3\text{-}5)$$

$$n(r) = n_1\sqrt{(1-2\Delta)} = n_2 \qquad r > a \qquad (b\text{-}3\text{-}5)$$



شكل (5 ـ 4) ـ ليف ذو دليل متدرِّج . (a) مظهر جانبي لدليل الانكسار . و (b) منظر طرفي و (c) منظر مقطع عرضي .

حيث :

n_1 = دليل الإنكسار على طول محور الليف .

n_2 = دليل الإنكسار خارج النواة (دليل إنكسار الكساء)

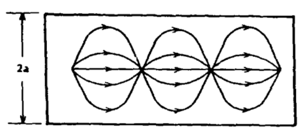
a = نصف قطر النواة

α = معلمة تصف تغير المظهر الجانبي لدليل الإنكسار .

Δ = معلمة تحدد مقياس تغير المظهر الجانبي .

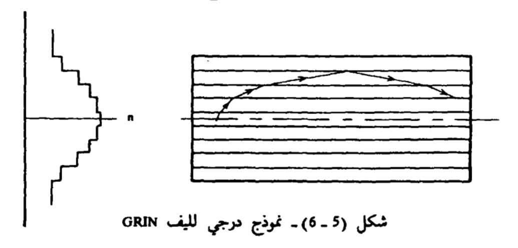
بحل المعادلة الأخيرة من أجل معلمة المقياس Δ ينتج: $\Delta=(n_1^2-n_2^2)/2n_1^2$. ومن أجل الحالة العادية حيث : $n_1 \approx n_2$ يؤدي هـذا إلى النتيجة التقريبية التالية : $\Delta=(n_1-n_2)/n_1$. نعرِّف الآن Δ كتغير دليل الإنكسار الكسري وقد حدّد أولاً في المعادلة (5 ـ 2) .

تنتشر الأشعة الضوئية في الليف بطريقة التذبذب المبينة في الشكل (5ـ5) .يسبب دليل الإنكسار المتغير أن تتوجه الأشعة من جديد وباستمرار نحو



شكل (5 ـ 5)ـ مسارات شعاع على طول ليف GRIN

محور الليف وتؤدي التغيرات الخاصة في المعادلتين (5-3-a) و (5-3-b) إلى إعادة توجيه الأشعة دورياً . يمكن أن نوضح هذا التوجيه الجديد بتمثيل التغير المتواصل في دليل الإنكسار بسلسلة من التغيرات الدرجية الصغيرة كما يبينه الشكل (5 ـ 6) . يمكن أن نصنع هذا النموذج بالدقة التي نرغبها وذلك بزيادة عدد الدرجات . إن العديد من ألياف GRIN تشبه هذا النموذج الدرجي وذلك لأن نواها قد صنعت على شكل طبقات . يتبع انحناء الأشعة عند كل درجة



شكل (5 ـ 6)ـ نموذج درجي لليف GRIN

صغيرة قانون Snell حسب المعادلة (2 ـ 3) . وكما تم وصفه في الفقرة (2 ـ 1) تنحني الأشعة بعيداً عن العمود عندما تنتشر من دليل انكسار عالي إلى دليل انكسار أصغر . وبتذكرنا هذا يصبح أثر الشعاع في الشكل (5 ـ 6) معقولاً . إن شعاعاً يعبر محور ليف سيصدم مجموعة من حدود الفصل وفي كل مرة ينتشر إلى منطقة ذات دليل انكسار أصغر ينحني أكثر نحو المحور الأفقي . عند أحد حدود الفصل بعيداً عن المحور تتجاوز زاوية الشعاع الزاوية الحرجة وينعكس الشعاع كلياً عائداً نحو محور الليف . وينتقل الشعاع الآن من منطقة ذات دليل انكسار منخفض إلى منطقة ذات دليل انكسار أعلى وهكذا ينحني نحو العمود إلى أن يعبر محور الليف . عند هذه النقطة ستتكرر العملية . بهذه الطريقة يلتقط الليف شعاعاً مسبباً إياه أن يتذبذب ذهاباً وإياباً أثناء انتشاره في الليف .

إن الأشعة التي تعبر المحور أفقياً تقريباً في الشكل (5 ـ 5) تعود بعد انتشارها مسافة قصيرة فقط بعيداً عن المحور . تبتعد الأشعة ذات الميل الأكبر عن المحور وقد تنطلق بعض الأشعة بشكل عميق لدرجة أنها لن تعود مطلقاً . ولن تنحني بدرجة كافية لتتعرض لانعكاسات الزاوية الحرجة . إن هذه الأشعة سوف لن تلتقط . ونرى الآن بأنه ستنتشر في ليف GRIN فقط الأشعة الواقعة ضمن مجال زاوي محدود . لكل من ألياف GRIN وألياف SI هذه الخاصة المشتركة . يملك ليف GRIN فتحة نفوذ عددية وزاوية قبول مرافقة لها ويعتمد تعبير NA على معلمتي α وΔ .

اعتبرنا في الفقرة السابقة فقط الأشعة التي تثير الليف عند نقطته المركزية . لنفترض أن شعاعاً يدخل الليف بعيداً عن محوره كما تفعل الأشعة العليا المبينة في الشكل (5 ـ 7) . إن هذه الأشعة لا تنحني كثيراً لأنها تنتشر مسافة قصيرة فقط في النواة في الاتجاه العرضي . إذا دخل أحد هذه الأشعة بشكل أفقي تقريباً يمكن أن ينحني لدرجة كافية حتى يعاد توجيهه نحو المحور ويتابع مسيره في دليل الموجة . وعند زاوية دخول صغيرة نسبياً يكون الانحناء غير كاف على أي حال من أجل أن يخلق انعكاس زاوية حرجة وسيمر الشعاع إلى الكساء . نستنتج أن زاوية الدخول التي تسبب أشعة ملتقطة تتناقص تبعاً لتحرك نقطة الإثارة بعيداً من محور الليف . وبكلمات أخرى تتناقص زاوية

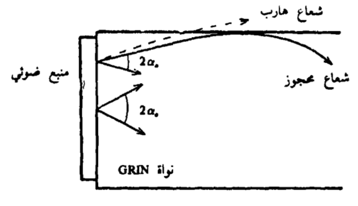
القبول وفتحة النفوذ العددية تبعاً للبعد نصف القطري من المحور . إن الإقتران من منبع ضوئي مستوي متاخم لليف GRIN يبينه الشكل (5 ـ 7) . حيث تظهر الأحجام النسبية لزوايا مخروط القبول . ويكون الاقتران أكثر فعالية قرب المحور منه في الأمكنة الأبعد . إن هذا لا يشبه سلوك ليف SI الذي من أجله تبقى NA هي ذاتها بغض النظر عن نقطة الدخول . لهذا السبب تكون كفاءة الاقتران لألياف SI عموماً أكبر من كفاءة الاقتران لألياف GRIN عندما يكون لكل ليف حجم النواة ذاتها وتغير دليل انكسار جزئي ذاته .

عندما تكون $\alpha=2$ في المعادلة (5 ـ 3) يصبح دليل انكسار النواة ما يلي : $n(r) = n_1 \sqrt{[1-2(r/a)^2\Delta]}$. من أجل $\Delta<<1$ كما هو الحال عادة يمثل هذا التغير على نحو ملائم بما يلي من أجل $r\leqslant a$:

$$n(r) = n_1 \, [1-(r/a)^2 \, \Delta] \qquad \text{(a-4-5)}$$

ومن أجل $r>a$ تكون :

$$n_2 = n_1 \, (1-\Delta) \qquad \text{(b-4-5)}$$



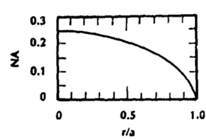
شكل (5 ـ 7) ـ تتناقص زاوية مخروط القبول ($2\alpha_0$) بابتعاد نقطة الاثارة عن محور الليف

يدعى توزع دليل الانكسار هذا المظهر الجانبي ذا القطع المكافىء وتكون فتحة النفوذ العددية من أجل المظهر الجانبي ذي القطع المكافىء كما يلي :

$$NA = n_1 \, (2\Delta)^{1/2} \sqrt{[1-(r/a)^2]} \qquad \text{(5-5)}$$

لقد رسمنا هذا التابع في الشكل (5 ـ 8) من أجل $n_1=1.48$ و $\Delta=0.0135$. تعطي هذه النتائج القيم التـالية : $n_2=1.46$ و NA المحورية = 0.24 وهي القيم ذاتها من أجل الليف ذي الدليل الدرجي في الجدول (5 ـ 1) . تهبط NA إلى الصفر عند حافة النواة وسيوجه فقط الشعاع الموازي تماماً إلى محور الليف إذا دخل الدليل الموجي عند هذه النقطة .

إن قيمة NA المحورية لليف قطع مكافىء هي : $NA=n_1\sqrt{(2\Delta)}$. من المعادلة (4 ـ 41) تكون فتحة النفوذ العددية لـ SI : $NA=\sqrt{(n_1^2-n_2^2)}$.



شكل (5 ـ 8) ـ فتحة النفوذ العددية لليف ذي دليل انكسار قطع مكافىء . $n_1=1.48$ و $\Delta=0.0135$

يمكن كتابة هذا الحد الأخير كما يلي : $\sqrt{[(n_1-n_2)\ (n_1+n_2)]}$
الذي يصبح : $\sqrt{[2n_1(n_1-n_2)]}$ عندما $n_1\approx n_2$. بتبديل (n_1-n_2) بـ $n_1\Delta$ ينتج من المعادلة (5 ـ 2) ما يلي :

$$NA = n_1\sqrt{(2\Delta)} \qquad (6\text{-}5)$$

وذلك من أجل دليل موجة درجي مماثل إلى NA المحوري لليف ذي دليل انكسار قطع مكافىء .

إن المظهر الجانبي لدليل الانكسار المعطي بالمعادلة (5 ـ 3) هو عام إلى حد كبير . لقد رأينا كيف ينتهي إلى المظهر القطع المكافىء . ويتضمن أيضاً ليف SI إذا جعلنا $\alpha=\infty$. وبعمل هذا في المعادلة (5 ـ 3) بنتج $n(r)=n_1$ ضمن النواة . ويبقى دليل الانكسار عند n_2 في الكساء .

(3 ـ 5) ـ التخامد Attenuation

إن تخامد الإشارة عامل رئيسي في تصميم أي نظام اتصالات حيث تتطلب جميع المستقبلات أن تكون قدرة الدخل فيها فوق سوية دنيا وهكذا تؤدي خسارات الإرسال إلى تحديد الطول الكلي للمسار . توجد عدة نقاط في نظام بصري حيث تحدث الخسارات وهي عند قارن مدخل القناة والوصلات الدائمة والموصلات وداخل الليف ذاته . سندرس في هذا البند الخسارات المرتبطة بالليف .

نحتاج أن نعتبر أنفسنا معنيين فقط بخسارات الليف في مجال من أطوال موجة من حوالي $0.5\ \mu m$ إلى $1.6\ \mu m$. وهذا هو المدى الذي تكون ضمنه الاتصالات الليفية أكثر عملية . تعود أسباب هذا إلى إمكانية بناء ألياف ضعيفة الخسارة ومنابع ومكاشيف فعالة في هذا المدى وإلى صعوبة تحقيق ذلك خارج هذا المدى . إن التفاصيل التي تؤيد هذا الاستنتاج تظهر في بقية هذا البند وفي الفصول التي تغطي المنابع البصرية والمكاشيف الضوئية .

كما ذكرنا سابقاً تصنع الألياف من المواد البلاستيكية والزجاجية . تتضمن متطلبات المادة الخسارة الضعيفة وإمكانية تشكيلها إلى ألياف شعرية طويلة . إضافة لذلك يجب أن تكون المادة قابلة لتغيرات طفيفة بحيث يمكن الحصول على دليلي انكسار واحد للنواة وآخر للكساء . فيما يخص الليف ذا دليل الانكسار المتدرج يجب أن يكون التغير المتواصل في دليل الانكسار ممكناً يمكن أن تصنع الألياف ذات الدليل الدرجي من البلاستيك أو الزجاج وتكون الألياف ذات الدليل المتدرج عادة من الزجاج . تملك الألياف الزجاجية عموماً امتصاصاً أقل من الألياف البلاستيكية لذلك تفضل من أجل الاتصالات للمسافات الطويلة .

الزجاج Glass

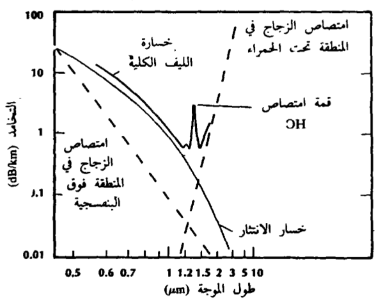
إن الزجاج الأكثر أهمية هو الذي يشكل من صهر جزيئات السيليكا (ثاني أوكسيد السيليكون (SiO_2) . إن الزجاج الناتج ليس مركباً بل مزيجاً من جزيئات

SiO_2 ذات تغيرات في المواقع الجزيئية ضمن المادة وهذا ليس كمثل بنية بلورية والتي تشكل فيها مواقع ذرات المركب أنماطاً ثابتة متكررة . وللحصول على أدلة انكسار متنوعة تضاف مواد أخرى إلى المزيج مثل التيتانيوم والثاليوم والجرمانيوم والبورون ومواد أخرى فينتج زجاج عالي السيليكا يمكن أن يتشكل منه ليف منخفض الخسارة إذا تم الوصول إلى نقاء كيمياوي عالي .

يمكن تصنيف الخسارات الحاصلة في الألياف الزجاجية كتأثيرات امتصاصية Absorption وتناثرية Scattering وهندسية Geometric .

الامتصاص Absorption

وحتى أكثر أنواع الزجاج نقاءاً سيمتص بشدة ضمن مناطق معينة من أطوال الموجات وهذا ما يسمى بالامتصاص الضمني وهو صفة طبيعية للزجاج ذاته . إن الامتصاص الضمني قوي جداً في الجزء من الطيف الكهرمغناطيسي فوق البنفسجي ذي طول الموجة القصيرة . يتميز الامتصاص نتيجة نطاقات العبور الجزئية والالكترونية القوية بقيمة ذروة للخسارة في منطقة فوق البنفسجية وبقيمة خسارة تتناقص عند الاقتراب من المنطقة المرئية . لذلك تنعدم فوق البنفسجية عند استعمال أنظمة ليفية وهذا ليس بذي أهمية . يحتمل أن تمتد نهاية



شكل (5 ـ 9) ـ تخامد ليف زجاجي سيليكا مطعم بالجرمانيوم .

الامتصاص فوق البنفسجي إلى المنطقة المرئية إلا أنها تعتبر عموماً أنها تقدم خسارة صغيرة جداً عند هذه النقطة . يبين الشكل (5 ـ 9) الامتصاص فوق البنفسجي .

تحدث ذروات امتصاص ضمني ايضا في مجال تحت الحمراء . تقع الذروات بين 7 μm و 12 μm لمركبات زجاج نموذجية بعيداً عن المنطقة ذات الاهتمام . يترافق الفقد ما تحت الحمراء باهتزازات للروابط الكيميائية مثل رابطة السيليكون ـ الأوكسجين . تسبب الطاقة الحرارية أن تتحرك الذرات باستمرار وهكذا تتقلص رابطة SiO وتتمدد باستمرار . يتمتع هذا الاهتزاز بتردد طنين في المنطقة تحت الحمراء . وكما يبينه الشكل (5 ـ 9) تمتد حواف آلية الامتصاص هذا نحو المنطقة من طول الموجة حيث تعمل الأنظمة الليفية . وهي تبدي خسارة صغيرة عند الحد الأعلى من مجالنا 1.6 μm . وفي الحقيقة يمنع استعمال ألياف السيليكا بعيداً جداً عن طول الموجة هذا .

نستنتج أن الخسارات الضمنية تكون غير مهمة في منطقة عريضة حيث يمكن أن تعمل الأنظمة الليفية . إلا أن هذه الخسارات تمنع امتداد الأنظمة الليفية نحو فوق البنفسجية وكذلك نحو أطوال الموجة الأطول .

تعتبر الشوائب المصدر الرئيسي للخسارة في أي ليف عملي . يوجد نوعان من الشوائب مزعجان بشكل خاص وهما أيونات العبور للمعدن وأيونات OH .

إن الشوائب المعدنية مثل Cr, Mn, Ni, Co, V, Cu, Fe تتمتع بقوة امتصاص في المنطقة المعنية ويجب ألا تتجاوز سوياتها بضعة أجزاء لكل بليون من أجل الحصول على خسارات دون 20 dB/km . وقد تم الحصول على مثل هذا النقاء في الألياف ذات السيليكا العالية وقد كانت الخسارة في الواقع فيها ضعيفة .

تشمل آلية الخسارة في المعادن مدارات الكترونية داخلية غير كاملة الامتلاء ويؤدي امتصاص الضوء إلى أن تتحرك الالكترونات من المدار ذي السوية الأدنى (حالة طاقة منخفضة) إلى مدار ذي سوية أعلى (حالة طاقة

أعلى) . يتم الحصول على طاقة الالكترون المكتسبة من الضوء الوارد . إن طاقات العبور المسموح لها تطابق فوتونات ذات ترددات تقع في المنطقة ذات الأهمية من أجل الاتصالات الليفية .

من وجهة نظر عملية إن الشائبة الأكثر أهمية لتنقّص حتى الحد الأدنى هي أيون الهيدروكسيد OH . إن آليــة الخســـارة لأيون OH هي الاهتزاز المتراخي تماماً مثل امتصاص رابطة SiO . تهتز ذرات الهيدورجين والأكسجين بسبب الحركة الحرارية . يحدث تردد الطنين عند طول موجة 2.73 µm . مع أن ذروة الامتصاص تقع عند 2.73 µm (خارج النطاق موضع اهتمامنا) فإن الأنطقة المركبة وأنطقة التوافقيات لهذا الطنين تقع ضمن المدى المعني . إن خسارات OH الأكثر أهمية تحدث عند 1.37 µm و 1.23 µm و 0.95 µm عندما تكون أيونات OH محتضنة في ليف سليكا . يمكن أن تلاحَظ ذروات امتصاص OH على منحني خسارة الليف في الشكل (5 ـ 9) . من أجل تحقيق نتائج كتلك المبينة يجب أن تكون شوائب OH أقل من بضعة أجزاء لكل مليون . تتخذ احتياطات خاصة خلال تصنيع الزجاج لكي نضمن سوية منخفضة من شوائب OH في المنتج النهائي . تحتوي الألياف الجافة سويات OH منخفضة بشكل خاص بينما تحتوي الألياف الرطبة سويات OH أعلى بقليل . يشير امتصاص OH فـي منطقة الخسارة الضمنية المنخفضة إلى أي من أطوال الموجة الذي يجب تجنبه من أجل انتشار أكثر فعالية .

تساهم العيوب الذرية أيضاً في امتصاص الليف . كمثال على ذلك : إن التيتانيوم (Ti^{4+}) المستعمل في تطعيم الزجاج لا يمتص . فأثناء التلّيف وهو (تشكيل ألياف شعرية من الزجاج المشكل مسبقاً) يحدث انخفاض لبعض ذرات (Ti^{4+}) إلى حالة (Ti^{3+}) . وفي هذه الحالة الأخيرة يتصف التيتانيوم بالامتصاص الشديد . يمكن انقاص عملية التخفيض هذه إلى الحد الأدنى بتقنيات تصنيع مناسبة .

إن إشعاع الزجاج بواسطة أشعة x وأشعة غاما والنيوترونات والالكترونات يخلق أيضاً عيوباً ذرية امتصاصية . إن الألياف ذات درجة

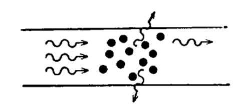
السيليكا العالية وذات النقاء العالي تكون أكثر مقاومة لامتصاص شائبة اشعاعية من الألياف البلاستيكية أو من الزجاج الأقل نقاء . إن ألياف PCS تكون أيضاً إلى حد ما مقاومة للاشعاع .

يمكن أن يحدث تلوث للزجاج إذا صهر في وعاء معدني مثل بوتقة من البلاتين إن المعدن الملوِّث لا يمتص عندما يكون أوكسيداً . عندما يهدرج الزجاج تدخل ذرات المعدن الحر إلى الزجاج فتؤدي إلى خسارة كبيرة . إن معالجات تصنيع الليف التي لا تتطلب بواتق تحل هذه المشكلة . إن تحرير المعدن من الأوكسجين يعتمد على درجة الحرارة وإن المحافظة على المعدن عند أقل من درجة حرارة حرجة ما يلغي هذه المشكلة . في أي ليف ضعيف الخسارة وعالي النوعية يهمل التخامد العائد لهذا التأثير .

انتشار ريلاي Rayleigh Scattering

تتحرك الجزيئات عشوائياً في الزجاج في الحالة المنصهرة أثناء التصنيع وتقدم الحرارة المطبقة الطاقة من أجل هذه الحركة . وعندما يبرد السائل تتوقف الحركة . وعند الوصول إلى الحالة الصلبة تثبت المواقع الجزيئية العشوائية داخل الزجاج فينتج عن هذا تغيرات موضعية في الكثافة وبالتالي تغيرات موضعية لدليل الانكسار خلال الزجاج . تمثل هذه التغيرات جسيمات ناثرة صغيرة مطمورة في مادة متجانسة أصلاً . إن أحجام هذه الجسيمات أصغر بكثير من أطوال الموجة البصرية .

عندما تمر حزمة ضوئية خلال بنية كهذه تتناثر بعض من طاقتها بفعل هذه الجسيمات كما يبينه الشكل (5 ـ 10) ويعرف هذا النوع من الخسارة بانتشار Rayleigh الذي يطبق حيثما تنتشر موجة ما خلال وسط فيه جسيمات ناثرة أصغر من طول الموجة . حيث أن انتشار Rayleigh يتناسب مع (λ^{-4}) لذلك تتزايد أهميته باطراد تبعاً لتناقص طول الموجة . يبين الشكل (5 ـ 9) على ماذا تعتمد خسارة الانتثار .



شكل (5 ـ 10) ـ انتثار Rayleigh يبين تخامد سيل وارد من الفوتونات بسبب التغيرات الموضعية في دليل الانكسار .

يوجد سبب آخر لخسارة الانتثار . عندما تتألف مادة ليفية من أكثر من أوكسيد واحد يمكن أن يحدث تراوح في تركيز الأكاسيد المؤسسة . ليست هذه هي مشكلة الترابط الكيميائي غير التام للمركبات المختلفة . في هذه الحالة يتغير تركيب الزجاج من مكان إلى مكان ضمن الزجاج . ومرة أخرى يكون لدينا تغير موضعي في دليل الانكسار يؤدي إلى خسارة Rayleigh تتناسب مع (λ^{-4}) .

يبدو واضحاً أن الانتثار يحد بشكل قوي من استعمال الألياف عند أطوال الموجة القصيرة . فعند طول موجة أقل من 0.8 μm تبلغ الخسارة العائدة لهذا الأثر وجده قيمة مانعة للانتشار لمسافات طويلة. ومن جهة أخرى عندما يتزايد طول الموجة تتناقص خسارة الانتثار . تقدم هذه النتيجة حافزاً للعمل عند طول موجة يزيد عن 0.8 μm .

إن خسارات الكثافة والخسارات التركيبية الموصوفة آنفاً هي خسارات ضمنية ولا يمكن إزالتها بواسطة أي تقنية معالجة كانت . يمكن إزالتها فقط بالتغيير الفعلي للتركيب . إن خسارات الانتثار المعرّفة بهاتين الظاهرتين تعتبر حداً أدنى لا يمكن دونه تصنيع الليف من زجاج محدد .

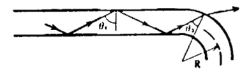
اللا تجانس Inhomogeneities

إن اللا تجانس في المادة الذي يدخل في الزجاج عن غير قصد خلال التصنيع يسبب أيضاً خسارات انتثار . إن المزج غير التام وانحلال المواد الكيماوية يمكن أن يسبب لاتجانساً في النواة . يمكن أن تنتج المعالجة الناقصة سطحاً فاصلاً خشناً بين النواة والكساء . إن جسيمات الانتثار في هذه الأمثلة تكون أكبر من طول الموجة البصرية. وليس كمثل تبعثر Rayleigh فإن الخسارت

التي تسببها الجسيمات الضخمة لا تعتمد على طول الموجة . بالإضافة لما سبق يمكن التحكم بهذه الخسارات بتقنيات تصنيع مناسبة .

التأثيرات الهندسية Geometric Effects

إن إنحناء الليف يسبب تخامداً . هناك نوعان من الانحناءات منها ما يرى بالعين المجردة ومنها ما هو مجهري . يشير النوع الأول (النوع المنظور) إلى الانحناءات ذات المقياس الكبير مثل تلك التي تحدث عن قصد عند لف الليف على ملفات أو عند سحبه حول زاوية . يمكن ثني الألياف بأنصاف أقطار تقوسات صغيرة حتى 10 cm وبخسارة مهملة . ولا يحدث انكسار عادة ما لم يصل نصف قطر الانحناء إلى أقل من 150 مرة قطر الليف . مثلاً إذا كان القطر 125 μm يكون نصف قطر الانحناء قبل أن يحدث الانكسار هو 1.9 cm . ويبين هذا مرونة الألياف الزجاجية . يمكن أن توضح خسارة الانحناء بعدة طرق . نرى على الشكل (5 ـ 11) شعاعاً محصوراً يتابع تقدمه في ليف SI ويصدم السطح البيني بين النواة والكساء بزاوية $\Theta_1>\Theta_c$(الزاوية الحرجة) وهكذا يحدث انعكاس كلي . يدخل هذا الشعاع الانحناء ويصدم السطح البيني بزاوية Θ_2 وهي تبدو بوضوح أنها أصغر من Θ_1 والتي يمكن أن تكون أصغر من الزاوية الحرجة . تتناقص الزاوية Θ_2 بتناقص نصف قطر الانحناء . عند نصف قطر انحناء ما تصبح Θ_2 أصغر من الزاوية الحرجة فلا يحدث انعكاس كلي ويشع جزء من الموجة . إن الأساليب ذات المرتبة الأعلى (التي تنتشر قريبة من الزاوية الحرجة) تكون أكثر حساسية لهذا النوع من الخسارة من الأساليب ذات المرتبة الأدنى .



شكل (5 ـ 11) ـ الاشعاع عند الانحناء

يمكن توضيح الإشعاع عند الإنحناء من وجهة نظر أخرى . لنعتبر الطبيعة الموجية للضوء وليس بالأحرى الطبيعة الشعاعية له . عندما تتحرك

موجة ما حول انحناء يجب أن يتحرك الضوء عند خارج الانحناء بأسرع من الضوء عند داخله . كلما كان نصف قطر الانحناء أصغر كلما كان على الضوء عند خارج المنحني أن يتحرك بسرعة أكبر من أجل أن يتواصل بغير انقطاع . إن السرعة الضرورية قد تتجاوز سرعة الضوء حيث يشع الضوء عند هذه النقطة . يشبه الحال هنا خطاً من المتزلجين يدور حول نهاية واحدة من الخط . يجب على المتزلج عند الطرف البعيد أن يتحرك بأسرع من الآخرين جميعاً . عند سرعة ما سوف لن يتمكن هذا المتزلج من التواصل وسينقطع من الخط . يمثل خط التزلج جبهة الموجة ضمن النواة .

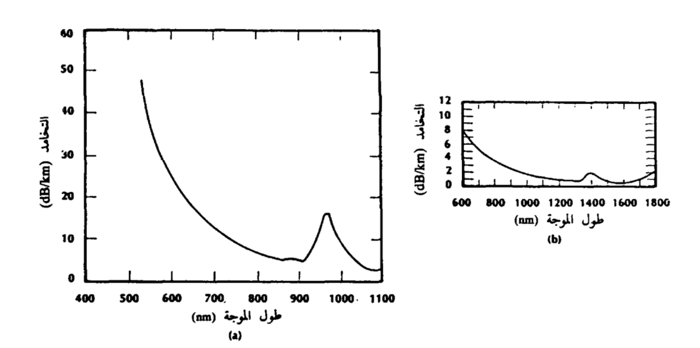
يحدث الانحناء المجهري غالباً عندما يغلف الليف ضمن كابلٍ واقٍ . تؤدي الجهود الناشئة عند صناعة الكابل إلى تشوهات محورية صغيرة (انحناءات ميكروية) تظهر عشوائياً على طول الليف . وهذه الانحناءات الميكروية تقرن الضوء بين الأساليب الموجَّهة المختلفة لليف مما يؤدي إلى أن بعضا من الضوء يخرج من الليف وبسبب هذا التأثير تتزايد خسارة الليف بعد عملية تصنيعه في كابل عما كانت عليه قبل تغليفه .

التخامد الكلي Total Attenuation

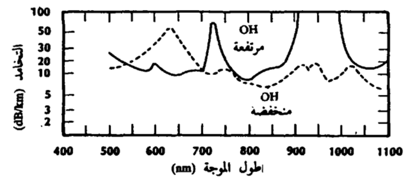
بتوحيد جميع ظواهر الخسارة ما عدا تلك الناتجة عن تصنيع الكابل ينتج منحنى التخامد الذي يبينه الخط المستمر في الشكل (5 ـ 9) . يبين هذا المنحنى كيف أن منطقة الخسارة المنخفضة لألياف زجاج سيليكا مقيَّدة عند جانب طول الموجة القصير بواسطة التناثر وعند جانب طول الموجة الطويل بواسطة امتصاص ما تحت الحمراء . تقع القيمة الدنيا للخسارة قرب 1.5 μm .

تبين الأشكال (5 ـ 12) و(5 ـ 13) و(5 ـ 14) منحنيات التخامد الطيفية لعدة أنواع من الكابلات الليفة المتوفرة تجارياً. تخص هذه المنحنيات على التوالي الكابلات الزجاجية و PCS والبلاستيكية . إن الألياف الزجاجية هي سيليكا نقية وسيليكا مطعَّمة . وإن ليف PCS هو نواة سيليكا نقية وكساء سيليكون RTV أما الليف البلاستيكي فهو نواة بوليميتيل ميتاكريلات وكساء

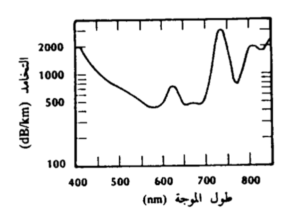
فلوروبوليمر . تنطبق منحنيات تخامد الزجاج على كلا الليفين SI و GRIN أما المنحنيات الأخرى فهي لألياف SI .



شكل (5 ـ 12) ـ التخامد الطبقي لألياف مكونة كلياً من الزجاج متعددة الأساليب .
(a) ليف معدّ للعمل الأمثل في المدى من 800 nm إلى 900 nm (شركة ITT) و (b) ليف مصمم للتطبيقات في كل من المدى من 800 nm إلى 900 nm وفي منطقة طول الموجة الأطول من 1200 nm إلى 1600 nm (سوميتومو للصناعات الكهربائية ـ المحدودة) . إن الليف في (b) ذو مقدار من OH صغير جداً .



شكل (5 ـ 13) ـ التخامد الطيفي لكابل ليفي سيليكا مكسوٍ بالبلاستيك (شركة Raychem أريزونا ـ قسم الليف البصري Maxlight .



شكل (5 ـ 14) ـ التخامد الطيفي لكابل ليفي مكون كلياً من البلاستيك
(Dupont CROFON)

إن الخسارة الصغيرة للألياف الزجاجية بين 800 nm و 900 nm تجعل هذه المنطقة عملية حتى من أجل وصلات المسافات الطويلة . تسمى هذه المنطقة أحياناً النافذة الأولى. وفي المدى بين 1300 nm و 1600 nm تكون خسارات الزجاج أقل كما يبينه الشكل (b-12-5) . وتدعى هذه المنطقةُ النافذةَ الثانيةَ . يبدو امتصاص OH عند 950 nm ظاهراً في الشكل (a-12-5) . إن لألياف PCS عموماً تخامداً أكبر من تخامد الألياف الزجاجية . وإن عمل هذه الألياف ممكن في منطقة تحت الحمراء (حول 800 nm) وفي المنطقة المرئية من أجل مسارات متوسطة الطول . إن خسارات الألياف المكونة كلياً من البلاستيك مرتفعة فعلاً وبهذه الألياف يمكن تحقيق مسافات إرسال قصيرة فقط .

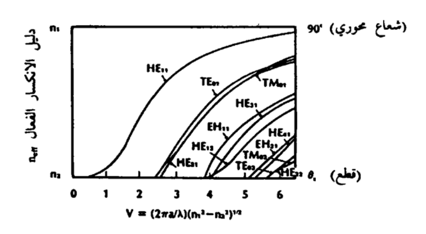
(5 ـ 4) ـ الأساليب في الألياف ذات الدليل الدرجي
Modes In Step-Index Fibers

يظهر في الشكل (5 ـ 15) مخطط الأسلوب للألياف ذات الدليل الدرجي . وهذا المخطط يشبه مخطط أسلوب دليل الموجة الطبقي المتناظر في الشكل (5 ـ 4) . هناك اختلاف واحد وهو أن مخطط الليف قد نظم برسم دليل الانكسار الفعال كتابع للمتغير V . يدعى V التردد المقيَّس ويعطى بالمعادلة التالية :

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \qquad (7\text{-}5)$$

حيث a هو نصف قطر النواة و λ هو طول موجة الفراغ الحر . باستعمال V يمكن رسم مخطط واحد يطبق على أي مجموعة من قيم a و λ و n_1 و n_2 . أثناء مناقشتنا خواص الانتشار التي يمكن أن تستنتج من مخطط أسلوب الـ SI يمكن أن تلاحظ المظاهر العديدة المشتركة لانتشار الموجة في الليف وفي الأدلّة الموجية الطبقية .

يبين المخطط وجود عدة أساليب . إن الأساليب TE و TM هي أساليب مغناطيسية عرضية وكهربائية عرضية كما عرفت في الفقرة (4 ـ 2) . إن الأساليب HE و EH هي أساليب هجينية يحتوي كل منها مركبات الحقلين الكهربائي والمغناطيسي وتسلك منحى محور الليف . يمثل كل منحنى في الشكل (5 ـ 15) في الواقع أسلوبين أحدهما مستقطب عمودياً بالنسبة للآخر في المستوى العرضي . يقع دليل الانكسار الفعال بين دليل انكسار الكساء ودليل انكسار النواة . ومن أجل أسلوب محدد يتغير n_{eff} تبعاً لطول الموجة مسبباً تشتيت دليل الموجة . عند قيمة ثابتة من V يمكن أن تنتشر عدة أساليب ولكل واحد منها دليل انكسار مختلف ويؤدي هذا الشرط إلى التشوه الظاهري . يمكن الحصول على عامل الانتشار الطولي من n_{eff} بتطبيق المعادلة (4 ـ 7) $\beta = k_o n_{eff}$. تحدد زوايا الشعاع من المعادلة (4 ـ 8) .



شكل (5 ـ 15) ـ مخطط أسلوب لألياف ذات دليل درجي (بترخيص من (Academic press, Inc Keck

وكما هو الحال في الدليل الموجي الطبقي تقطع (Cut off) الأساليب عندما تنتشر أشعتها عند الزاوية الحرجة . إن الأشعة البعيدة عن القطع تنتشر تقريباً مباشرة في الليف وبقرب $90°$. وعند قيم كبيرة من V ستنتشر عدة أساليب أخرى . تطابق قيمة كبيرة من V نصف قطر نواة كبير نسبياً . وعندما تكون $V>10$ يقرّب عدد الأساليب (المتضمنة لجميع الاستقطابات) بالعلاقة التالية :

$$N = \frac{V^2}{2} \qquad (8\text{-}5)$$

مثال :

احسب عدد الأساليب لليف ذي قطر نواة $50\ \mu m$. افترض أن $n_1=1.48$ وإن $n_2=1.46$ كما فعلنا من أجل الليف المكون كلياً من الزجاج في الفقرة (5 ـ 1) وان $\lambda=0.82\ \mu m$.

الحل :

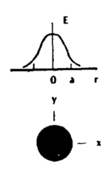
تحسب قيمة V من المعادلة (5 ـ 7) :

$$V = \frac{2\pi(25)}{0.82}\sqrt{(1.48^2 - 1.46^2)} = 46.45$$

وعندئذ نجد من المعادلة (5 ـ 8) أنه يوجد 1078 أسلوب .

يبدو واضحاً من هذا المثال بأنه حتى الليف الصغير نسبياً يمكن أن يتحمل عدداً كبيراً من الأساليب . وحيث أن التردد المقيس يتناسب مع الفرق بين دليلي الانكسار لكل من النواة والكساء فإن المحافظة على هذا الفرق صغيراً يقلل عدد أساليب الانتشار .

إن الأسلوب ذا المرتبة الأدنى لليف SI هو الأسلوب HE_{11} . وان نمط حقله العرضي المرسوم في الشكل (5 ـ 16) ذو شكل غوسي تقريباً . وإن النمط متناظر دائرياً كما يشير إليه الشكل . وكما في دليل الموجة الطبقي يوجد حقل سريع الزوال مضمحل خارج النواة ولجميع الأساليب . وكلما كان الأسلوب أقرب إلى القطع كلما كان اختراق الموجة في الكساء أعمق . بعيداً عن حالة القطع تمر موجة منتشرة بكاملها تقريباً في النواة .



شكل (5 ـ 16) ـ نموذج عرضي للأسلوب ذي المرتبة الأدنى في الليف SI ، الأسلوب HE_{11} .

إن الانتشار ذا الأسلوب الوحيد يكون مؤكداً إذا قطعت جميع الأساليب ما عدا الأسلوب HE_{11} . بالإشارة إلى الشكل (5 ـ 15) يحدث هذا إذا كانت $V<2.405$. وبضم هذه النتيجة مع المعادلة (5 ـ 7) ينتج أن :

$$\frac{a}{\lambda} < \frac{2.405}{2\pi\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}} = \frac{2.405}{2\pi NA} \qquad (9\text{-}5)$$

كشرط للانتشار وحيد الأسلوب . إن هذه النتيجة تشبه تماماً الشرط وحيد الأسلوب للدليل الموجي الطبقي المتناظر المعادلة (4 ـ 17) . وإذا تحققت شروط المعادلة (5 ـ 9) فإنه يمكن أن ينتشر في الليف الأسلوب HE_{11} فقط . يمكن أن يتواجد في الواقع في الليف وفي نفس اللحظة موجتان HE_{11} مستقطبتان عمودياً إلا أن لهما نفس قيمة n_{eff} ولذلك تنتشران بنفس السرعة . إن هذه الخاصة أكثر أهمية من حقيقة أنه يوجد في الواقع أسلوبان في معظم التطبيقات .

مثال :

ما هي أنصاف الأقطار العظمى المسموح لها لليف مكون كلياً من الزجاج في المثال السابق إذا كان للدليل الموجي أن يتحمل أسلوباً وحيداً $0.82\ \mu m$ ؟

الحل :

بوضع $n_1=1.48$ و $n_2=1.46$ و $\lambda=0.82\mu m$ في المعادلة (5 ـ 9) نجد : $a=1.3\ \mu m$.

نستنتج أن الألياف وحيدة الأسلوب ستكون صغيرة جداً . وبجعل n_2 أقرب إلى n_1 وبالعمل عند أطوال موجة أطول يمكن أن تزداد النواة . إن الألياف وحيدة الأسلوب العملية ذات أقطار نوى تتراوح بين 4 μm و 12 μm . إن التعامل مع أدلّة موجية بهذه الحجوم صعب . مع ذلك تتوفر ألياف وحيدة الأسلوب جذابة جداً للتطبيقات ذات النطاق العريض وللاستعمال مع المركبات البصرية المتكاملة . سنقارن إمكانيات عرض النطاق لألياف وحيدة الأسلوب ومتعددة الأساليب في الفقرة (5 ـ 6) .

(5 ـ 5) ـ الأساليب في الألياف ذات الدليل المتدرِّج (GRIN)

سوف لن ننشيء مخطط أسلوب للألياف المتدرِّجة وبدلاً عن ذلك سنعرض تعبيراً واضحاً لدليل الانكسار الفعال للأساليب المسموح لها . يمكن أن نعمل هذا للمظهر الجانبي ذي شكل القطع المكافىء الموصوف بالمعادلة (5 ـ 4) . ليس من الممكن إيجاد تعبير لـ n_{eff} من أجل التوزيع العام للدليل المتدرج في المعادلة (5 ـ 3) . يمثل المظهر الجانبي ذو القطع المكافىء ليف GRIN عملي . تطبق النتائج في هذه الفقرة بشكل خاص على الليف ذي القطع المكافىء . تسلك ألياف GRIN الأخرى سلوكاً مشابهاً نوعاً ما .

يعطى دليل الانكسار الفعال للأسلوب الموصوف بالأعداد الصحيحة p و q كما يلي :

$$n_{eff} = \frac{\beta_{pq}}{k_o} = n_1 - (p+q+1)\frac{\sqrt{(2\Delta)}}{k_o a} \qquad (10\text{-}5)$$

في الأسلوب الأدنى يكون p=q=0 . تتزايد الأعداد الصحيحة q و p بشكل منفصل لكل أسلوب جديد . إن للعوامل β و k_o المعنى السابق ذاته وهي على التوالي عامل الانتشار الطولي وعامل الانتشار في الفراغ الحر .

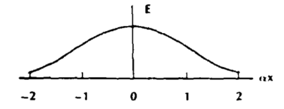
بدلالة التردد المقيس يقرِّب العدد الكلي للأساليب في ليف GRIN متعدد الأساليب $N=V^2/4$ من أجل قيم كبيرة من V . وهذا هو نصف عدد الأساليب في ليف SI مماثل كما حدّد من المعادلة (5 ـ 8) . من أجل نواة 50 μm

و $n_1=1.48$ و $n_2=1.46$ سيكون عدد الأساليب 539 عند $0.82\ \mu m$. سيكون للأسلوب ذي المرتبة الأدنى حقلاً كهربائياً يعطى بالعلاقة التالية :

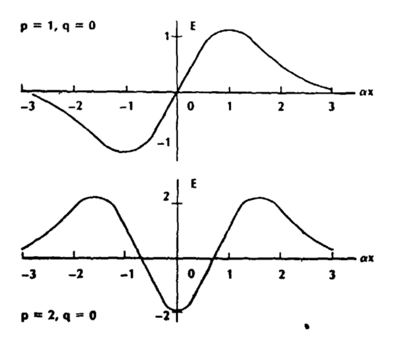
$$E_{oo} = E_o\, e^{-\alpha^2 r^2/2} \sin(\omega t - \beta_{oo} z) \qquad (11\text{-}5)$$

حيث : $\alpha = (k_o n_1/\alpha)^{1/2}\ (2\Delta)^{1/4}$ و $r^2 = x^2 + y^2$.

إن النمط العرضي المرسوم في الشكل (5 ـ 17) متناظر دائرياً وذو شكل غوسي . يبين الشكل (5 ـ 18) نمطي الأسلوبين p=1 و q=0 و p=2 و q=0 .



شكل (5 ـ 17) ـ نمط عرضي للأسلوب ذي المرتبة الأدنى في ليف GRIN ذي مظهر جانبي على شكل قطع مكافىء



شكل (5 ـ 18) ـ أنماط عرضية للأساليب ذات المرتبة الأعلى في ليف قطع مكافىء .

إن هذين الأسلوبيْن ليسا متناظرين دائرياً ويمكن ايجاد نمطيهما من المعادلتين التاليتين على التتالي :

$$E_{10} = E_1 \propto x e^{-\propto^2 r^2/2} \sin(\omega t - \beta_{10} z) \qquad (a\text{-}12\text{-}5)$$

و

$$E_{20} = E_2 [2(\propto x)^2 - 1] e^{-\propto^2 r^2/2} \sin(\omega t - \beta_{20} z) \qquad (b\text{-}12\text{-}5)$$

تبين المقارنة مع أنماط الدليل الموجي الطبقي المتناظر في الشكل (4 ـ 7) تشابهاً كبيراً بينها . إن إتساع الذروة لكل أسلوب يعتمد على إثارة الليف .

كما هو الحال مع جميع الأدلّة الموجية العازلة التي درسناها فإن لأساليب الانتشار المسموح لها أدلّة انكسار فعالة مقيدة بالعلاقة التالية :

$$n_2 \leqslant n_{eff} \leqslant n_1 \qquad (13\text{-}5)$$

يحدث قطع أي أسلوب عندما يساوي دليل انكساره n_2 . يمكن أن نحدد من هذه المعلومات العلاقة بين حجم النواة وطول الموجة وأدلّة الانكسار عند القطع . وإذا فعلنا هذا للأسلوب (1,0) أي (p=1, q=0) فإننا نجد شرط الانتشار وحيد الأسلوب . نحقق هذا بأن نضع $n_{eff}=n_2$ و p=1 و q=0 في المعادلة (5 ـ 10) . علماً بأن $k_o=2\pi/\lambda$ وبإجراء الحل من أجل a/λ ينتج شرط الأسلوب الوحيد وهو :

$$\frac{a}{\lambda} < \frac{1.4}{\pi \sqrt{n_1(n_1-n_2)]}} \qquad (14\text{-}5)$$

ان تحليلاً أكثر دقة يغير العامل 1.4 إلى العدد 1.2 . ومرة ثانية إذا جعلنا n_1 قريبة إلى n_2 وبالعمل عند أطوال موجة أطول سيسمح هذا بحجم نواة أكبر لأجل ليف وحيد الأسلوب . تبين مقارنة بين المعادلتين (5 ـ 9) و (5 ـ 14) أن القيمة العظمى لـ a/λ من أجل انتشار وحيد الأسلوب هي أكبر بـ 1.6 مرة لألياف قطع مكافىء مما هي لألياف SI .

مثال :

اعتبر ليف GRIN ذا مظهر جانبي بشكل قطع مكافىء فيه $n_1=1.48$ و $n_2=1.46$. احسب التغير الجزئي لدليل الانكسار وأكبر حجم نواة من أجل انتشار وحيد الأسلوب . احسب قيمة n_{eff} للأسلوب المنتشر باستعمال حجم النواة المحسوب . طول الموجة يساوي $0.82\ \mu m$.

الحل :

نجد من المعادلة (b-4-5) : $\Delta=(n_1-n_2)/n_1=0.0135$ ونحصل من المعادلة (5 ـ 14) على $a/\lambda=2.6$ و $a=2.1\ \mu m$. نضع في المعادلة (5 ـ 10) : $p=q=0$ و $k_o=2\pi/\lambda$ من أجل الحصول على ما يلي :

$$n_{eff} = n_1 - \frac{\sqrt{(2\Delta)}}{2\pi\ (a/\lambda)} = 1.47$$

من أجل الأسلوب (0,0) .

(5 ـ 6) ـ تشوه النبضة ومعدل المعلومات في الألياف البصرية
Pulse Distortion and Information Rate in Optic Fibers

تحدد أطوال المسارات في الوصلات الليفية بالتخامد وبتشوه النبضة . في بعض التطبيقات تكون الإشارة الواصلة إلى المستقبل ضعيفة للغاية من أجل استقبال واضح مع ان شكل الإشارة المستقبلة ليس موضع اعتراض . عندمايكون التخامد هو المشكلة الرئيسية نقول ان النظام محدود القدرة . لقد غطينا في الفقرة (5 ـ 3) بحث الخسارات العائدة إلى الليف ذاته . سنحتاج فيما بعد إلى النظر في الخسارات الإضافية التي تحدث عند قارن المنبع وعند الوصلات الدائمة والموصلات . تكون القدرة لبعض الوصلات كافية إلا أن شكل الإشارة المشوهة يحول دون الاسترجاع الصحيح للرسالة المرسلة . سوف نبحث في هذه

الفقرة تشوه الإشارة في الليف معتمدين بشدة على المادة المقدمة في بحث الدليل الموجي الطبقي في الفقرة (4 ـ 5) .

التشوه في الألياف ذات الدليل الدرجي (SI) Distortion in S-I Fibers

تتشوه الإشارات في ليف SI بسبب تشتيت المادة وتشتيت دليل الموجة وبسبب انبساط النبضة متعدد الأساليب . إن مقدار انبساط النبضة متعدد الأساليب في دليل موجة طبقي عازل قد حسب وهو يساوي : $\Delta(\tau/L)=n_1(n_1-n_2)/(cn_2)$ في المعادلة (4 ـ 27) . يمكن ان يكتب هذا بدلالة تغير الدليل الجزئي Δ كما يلي وذلك عندما تكون $n_1\approx n_2$:

$$\Delta(\tau/L) = \frac{n_1}{c}\Delta \qquad (15\text{-}5)$$

وباستعمال القيم النموذجية للألياف الزجاجية $n_1=1.48$ و $n_2=1.46$ نجد أن $\Delta(\tau/L)=67$ ns/km وهذا بالأحرى عدد مرتفع . في الواقع قد أعطت معظم ألياف SI الزجاجية انبساطات نبضة أقل بقليل بحدود من 10 ns/km إلى 50 ns/km . ينشأ هذا التناقض من مصدرين : اختلاط الأساليب والتخامد التفضيلي . إن اختلاط الأساليب هو تبادل القدرة بين الأساليب . تنحرف الأشعة في أسلوب ما (بواسطة الانتثار وعند الانحناءات والتوصيلات) إلى مسارات أساليب أخرى . يمكن ان تتحرك الأشعة من الأساليب ذات المرتبة الأعلى إلى الأساليب ذات المرتبة الأدنى والعكس بالعكس . تكون نتيجة اختلاط الأساليب المتواصل هي أن الطاقة التي تطلق في أحد الأساليب تنتشر على طول مسار متعرج يقع بين المسار الأقصر (الأسلوب المحوري) والمسار الأطول (الزاوية الحرجة) . تنتشر جميع الأشعة على نفس الطول الكلي تقريباً مما يخفض بشكل ملحوظ انبساط النبضة متعدد الأساليب . ان اختلاط الأسلوب ليس تاماً وهكذا يكون التشوه الظاهري هو السبب الرئيسي للانبساط في ألياف SI . مع ان اختلاط الأساليب يقلل انبساط النبضة فهذا غير مرغوب فيه . ستوجه الانحرافات بعض الأشعة في مسارات أصغر من الزاوية الحرجة . وسيضيع ضوءها مما يزيد تخامد الليف .

إن المصدر الثاني لتناقص انبساط النبضة هو التخامد الأكبر الذي تسببه الأساليب ذات المرتبة الأعلى . من بين جميع الأساليب تلك التي تكون الأسرع انتشاراً في الليف على طول مساراتها المتعرجة والتي تخترق بعمق أكثر في داخل الكساء فهي بالتالي تكون عرضة لامتصاص أكثر . وإذا كانت اتساعاتها أصغر فإنها تسهم في النبضة المستقبلة بأقل مما تسهم به الأساليب ذات المرتبة الأدنى . ان الاستنتاج الذي يقود للمعادلة (5 ـ 15) افترض أن جميع الأساليب قد حملت نفس القدرة . إذا أهملت الأساليب ذات المرتبة الأعلى بسبب حجمها المتناقص سينتج انبساط نبضة أصغر مما تتنبأ به المعادلة (5 ـ 15) . أثناء إنقاص الانبساط سيزيد الامتصاص الاختياري تخامد الإشارة الكلي تماماً كما يفعله اختلاط الأساليب .

دعنا نؤكد أن التشوه الظاهري لا يعتمد على طول موجة المنبع أو على عرض نطاق المنبع .

يعطى انبساط النبضة الكلي $\Delta\tau$ العائد الى كل من تشوه التشتيت والتشوه الظاهري بالمعادلة التالية :

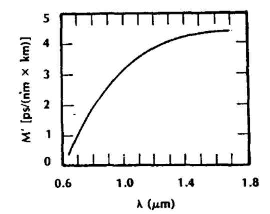
$$(\Delta\tau)^2 = (\Delta\tau)^2_{mod} + (\Delta\tau)^2_{dis} \qquad (16\text{-}5)$$

حيث $(\Delta\tau)_{mod}$ هو انبساط النبضة متعدد الأساليب و $(\Delta\tau)_{dis}$ هو الانبساط بالتشتت . يساهم التشتت فقط بمقدار صغير في الانبساط الكلي في ألياف الـSL متعددة الأساليب . مثلاً اعتبر واحد كيلومتر من ليف SI نموذجي ذي انبساط نبضة كلي مقداره 20 ns/km . وجدنا في الفقرة (3 ـ 2) أن انبساط المادة يساوي 2.2 ns/km عند 0.82 μm باستعمال LED ذي عرض طيفي 20 nm . نحسب من المعادلة (5 ـ 16) أن $(\Delta\tau)_{mod}=19.9$ ns مبينين التأثير المهمل لتشتيت المادة في ألياف الـ SI متعددة الأساليب .

كما أشرنا اليه في الفقرتين (4 ـ 5) و (5 ـ 4) يحدث تشتيت دليل الموجة لأن دليل الانكسار الفعال لأي أسلوب يتغير تبعاً لطول الموجة . تعطى كمية انبساط النبضة بالمعادلة (4 ـ 24) التي قدمناها من أجل دليل الموجة الطبقي . يكون حينئذٍ انبساط دليل الموجة الليفي كما يلي :

$$\Delta(\tau/L) = -\frac{\lambda}{c} n''_{eff}\Delta\lambda = -M'\Delta\lambda \qquad (17\text{-}5)$$

حيث 'M هو تشتيت دليل الموجة و $\Delta\lambda$ هو عرض خط المنبع . يبين الشكل (5 ـ 19) قيم نموذجية لـ 'M. يحسب انبساط التشتت الكلي وذلك بجمع



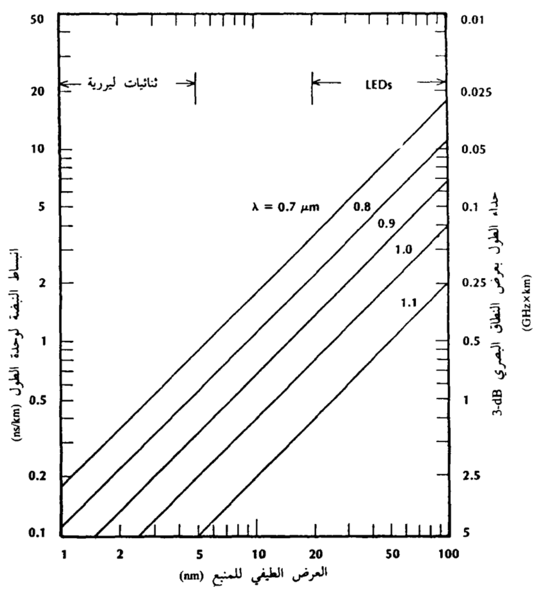
شكل (5 ـ 19) ـ تشتيت دليل موجة في ليف SI

المعادلتين (3 ـ 14) و (5 ـ 17) . وهكذا : $\Delta(\tau/L)_{dis}=-(M'+M)\Delta\lambda$. تبين المقارنة بين الشكلين (3 ـ 8) و (5 ـ 19) أن تشتيت دليل الموجة هو أقل بكثير من تشتيت المادة . فمثلاً : عند 0.82 μm يكون تشتيت المادة 110 ps/(nm×km) لكن تشتيت دليل الموجة هو حوالي 2 ps/(nm×km) فقط . ان تعريض دليل الموجة يمكن ان يهمل بشكل مطمئن ما عدا عند حوالي 1.3 μm حيث يقترب تشتيت المادة من الصفر .

يتناسب انبساط النبضة العائد إلى تشتيت دليل الموجة وتشتيت المادة مع عرض نطاق المنبع . ان ثنائي ليزر ذا عرض خط ضيق يقلل حتى الحد الأدنى هذا الانبساط . على أي حال يكون التشوه الظاهري مسيطراً في ليف ذي دليل درجي متعدد الأساليب مما يجعل ثنائي الليزر غير فعال كلياً في تنقيص الانبساط . ولهذا السبب تستعمل عادة منابع LED الأقل كلفة من أجل أنظمة تستعمل أليافاً ذات دليل درجي متعددة الأساليب .

التشوه في الألياف وحيدة الأسلوب Distortion in Single-Mode Fibers

للألياف وحيدة الأسلوب تشتيت دليل موجة وتشتيت مادة فقط . وكما يبدو بمقارنة الشكلين (3 ـ 8) و (5 ـ 19) يكون المُسهم الرئيسي في انبساط النبضة هو تشتيت المادة وهذا صحيح بشكل خاص في المدى الواقع من 0.8 μm إلى 0.9 μm . يبين الشكل (5 ـ 20) انبساط النبضة لكل وحدة طول MΔλ من أجل ليف وحيد الأسلوب . وقد أُخذ تشتيت المادة M من الشكل (3 ـ 8) .



شكل (5 ـ 20) ـ انبساط النبضة لليف وحيد الأسلوب . ان الانبساط المبين يسببه تشتيت المادة .

لاحظ ان انبساط النبضة يصبح أصغر من أجل أطوال موجة أطول وعروض خط منبع أضيق . يبين الشكل ميزات ثنائيات ليزر . إن حاصل جداء الطول بعرض الحزمة للتعديل 3 dB المستنتج من المعادلة (3 ـ 16) قد سمي بشكل ملائم على الجانب الأيمن من الشكل (5 ـ 20) .

عندما يكون طول موجة التشغيل بقرب 1.3 μm يجب أن يؤخذ تشتيت دليل الموجة بعين الاعتبار . وعند طول الموجة حيث يختفي تشتيت المادة يكون تشتيت دليل الموجة كبيراً . وبعد طول الموجة هذا مباشرة يصبح تشتيت المادة سالباً بينما يبقى تشتيت دليل الموجة موجباً فيحدث إلغاء يؤدي إلى انبساط نبضة صفري عند طول موجة لا يزال قريباً من 1.3 μm . عند هذه النقطة يؤدي تشتيت المادة إلى ان تنتشر أطوال الموجة الأقصر في الطيف الأصلي بسرعة أكبر بينما يؤدي تشتيت دليل الموجة إلى تباطؤ نفس أطوال الأمواج هذه . وفي المنطقة حيث يكون التشتت صغيراً يكون تخامد الليف صغيراً أيضاً كما يلاحظ من الشكل (5 ـ 9) . يمكن إنشاء أنظمة طويلة ذات معدل معلومات عالٍ باستعمال ألياف وحيدة الأسلوب تعمل بين 1.3 μm و 1.6 μm .

يجب أن تكون نواة ليف الـ SI وحيد الأسلوب صغيرة كما هو معطى بالمعادلة (5 ـ 9) . لقد حسبنا نصف قطر نواة مقداره 1.3 μm لطول موجة 0.82 μm و $n_1=1.48$ و $n_2=1.46$. ان لهذا الليف فتحة نفوذ عددية تساوي 0.24 . دعنا نبحث تصميم ليف وحيد الأسلوب ذي n_1 أقرب إلى n_2 وبهذا يمكن ان نجعل النواة أكبر وسيسهل هذا تصنيع الليف وسيقلل التفاوت المسموح به في الاقتران والوصلات الدائمة والتوصيل . افترض أن $n_1=1.465$ و $n_2=1.46$، ان قيمة NA لهذا الليف حينئذٍ وبموجب المعادلة (4 ـ 21) تساوي 0.12 . نجد من المعادلة (5 ـ 9) ان $a/\lambda<3.17$ كشرط لعمل وحيد الأسلوب . لنفترض اننا نرغب العمل عند 0.8 μm . يجب أن يكون نصف القطر أقل من 0.8(3.17)=2.54 μm أي ان يكون قطر النواة بحدود 5 μm . إذا غيرنا طول الموجة إلى 1.3 μm سيبقى الليف ذاته وحيد الأسلوب لأن المعادلة (5 ـ 9) تبقى محققة . يمكننا على أي حال زيادة حجم النواة عند 1.3 μm إلى

$1.3(3.17)=4.12\ \mu m$ أي قطر نواة بحدود $8.2\ \mu m$. وسيحمل أكثر من أسلوب واحد عند أطوال موجة أصغر من $1.3\ \mu m$. لقد أوضحنا مفهوم القطع لليف ذي أسلوب وحيد . ان طول الموجة الذي عنده يتساوى طرفا المعادلة (5 ـ 9) هو طول موجة القطع ذي الأسلوب الوحيد . ان أطوال الموجة الأصغر من قيمة القطع ستنتشر في أكثر من أسلوب واحد . وبحل المعادلة (5 ـ 9) من أجل موجة القطع لليف SI نحصل على ما يلي :

$$\lambda_c = 2.61\ a\ NA \qquad (18\text{-}5)$$

بينما يتزايد حجم نواة الأسلوب الوحيد مقرباً دليلي انكسار النواة والكساء من بعضهما ويتناقص الـ NA الخاص بالليف . ان هذا يجعل اقتران المنبع أقل كفاءة بسبب الانبساط الزاوي العريض للاشعاع من الباعثات البصرية الليفية النموذجية .

التشوه في الألياف ذات الدليل المتدرِّج Distortion in Graded-Index Fibers

تنتج ألياف GRIN تشوهاً متعدد الأساليب أقل بكثير مما تنتجه ألياف SI . يمكننا أن نوضح هذا بأن نأخذ بعين الاعتبار السرعات والمسارات في ليف GRIN . تأخذ الأشعة المحورية الطريق الأقصر بينما تنتشر في مسار أبعد الأشعة التي تقطع محور الليف بزوايا كبيرة وتتسارع عندما تنتشر في مناطق بعيدة عن المحور حيث يكون دليل الانكسار أصغر . (تذكر بأن $v=c/n$) وخلال الوقت المصروف بعيداً عن المحور تتقاطع الأشعة غير المحورية مع الأشعة المحورية . تنقص هذه العملية حتى الحد الأدنى انبساط النبضة متعدد الأساليب . تتمتع ألياف GRIN نموذجية متعددة الأساليب بانبساطات نبضة تبلغ بضعة ns/km أو أقل وهذا أقل بكثير من انبساطات النبضة في ألياف الـ SI .

يعطى التعبير التقريبي لانبساط نبضة ظاهري في ليف GRIN كما يلي :

$$\Delta(\tau/L) = \frac{n_1\ \Delta^2}{2\ c} \qquad (19\text{-}5)$$

ان مقارنة مع المعادلة (5 ـ 15) تبين تخفيضاً في انبساط النبضة بالعامل 2/Δ عندما يحل ليف GRIN محل ليف SI . من أجل ليف مكون كلياً من الزجاج ذي $n_1=1.48$ و $n_2=1.46$ وجدنا أن $\Delta=0.0135$ فيكون عامل التخفيض عندئذ 1.48 . لقد وجد سابقاً ان انبساط الدليل المتدرج كان 67 ns/km وهكذا يكون انبساط GRIN هو 0.45 ns/km .

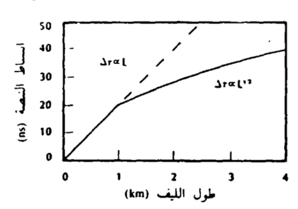
يمكن ان يضمَّن تشتيت المادة وتشتيت دليل الموجة في انبساط GRIN الكلي باستعمال المعادلة (5 ـ 16) . وكما هو الحال مع ليف SI يسود تشتيت المادة على تشتيت دليل الموجة في منطقة طول الموجة القصيرة . بالإشارة إلى الشكل (5 ـ 20) (الذي يبين انبساط نبضة المادة) لا يمكن الحصول على انبساطات من فئة النانو ثانية للكيلومتر أو أقل في المنطقة من 0.8 μm إلى 0.9 μm وذلك باستعمال منابع الـ LED . ان منبع LED يلغي الكثير من ميزات انخفاض التشوه الظاهري من أجل ليف GRIN في المنطقة ذات طول الموجة القصيرة . ان ثنائيات ليزر ضيقة الحزمة تكون أكثر توافقاً مع ألياف GRIN متعددة الأساليب . وعند طول موجة بقرب الـ 1.3 μm يكون التبديد صغيراً مما يجعل منابع الـ LED جذابة للاستعمال مع ألياف GRIN .

ان المظهر الجانبي ∝ في المعادلة (5 ـ 3) يمكن ان يعطي القيمة المثلى من أجل أقل تشوه ظاهري . تعتمد أفضل قيمة تأخذها ∝ على تركيب الزجاج وعلى طول موجة المنبع . ان المظهر الجانبي ذي شكل قطع مكافىء (∝=2) هو قريب من الحالة المثلى .

تبعية انبساط النبضة للطول Length Dependence of the Pulse Spread

قد ألمحنا الآن إلى ان تعريض النبضة يتزايد خطياً تبعاً لطول الليف . لقد أظهرت التجارب بألياف متعددة الأساليب ان هذا صحيح من أجل أطوال قصيرة (عادة أقل من 1 km) إلا انه في حال مسارات أطول لا يتزايد التعريض بسرعة كهذه . وبدلاً عن ذلك فانه يتناسب مع الجذر التربيعي للطول . يبين الشكل (5 ـ 21) الفرق بين هذين الشرطين. وتظهر التبعية للجذر التربيعي

من اختلاط الأساليب . وفي المسافات القصيرة يكون اختلاط الطاقة بين الأساليب غير كامل . وبعد مسير أبعد يتم الوصول إلى توزيع طاقة ظاهري متوازن . يستمر الاختلاط بينما تبقى الطاقة ذاتها في أي أسلوب . في هذا الشرط نلاحظ التبعية لـ $L^{1/2}$ يدعى الطول الذي عنده يتم الوصول إلى التوازن بطول التوازن L_e ويعتمد على الليف الخاص . في الشكل (5 ـ 21)



شكل (5 ـ 21) ـ تعويض نبضة متعددة الأساليب يبين تبعية خطية للطول من أجل مسارات قصيرة وتبعية لـ $L^{1/2}$ من أجل مسارات أطول .

أخذت $L_e=1$ km . وعلى العموم يمكن ان نكتب انبساط النبضة كما يلي :

$$\Delta\tau = L\,\Delta(\tau/L) \qquad \text{(a-20-5)}$$

من أجل $L \leqslant L_e$

وكما يلي :

$$\Delta\tau = (L.L_e)^{1/2}\,\Delta(\tau/L) \qquad \text{(b-20-5)}$$

من أجل $L > L_e$

حيث $\Delta(\tau/L)$ هو الانبساط لوحدة الطول في المنطقة الخطية . وقد أخذت مساوية إلى 20 ns/km في الشكل (5 ـ 21) .

ان لليف الجيد اختلاط أساليب صغير وهكذا يتحقق التوازن فقط بعد الانتشار لمسافة طويلة . ان ليفاً من غير اختلاط أساليب سيملك L_e غير محدود وسيزداد انبساط النبضة له خطياً مع الطول . ان لليف غير الجيد الكثير من اختلاط الأساليب العائد الى الانتشار والانحناءات الدقيقة (المجهرية)

واللا تجانس . ويكون L_e لهذا الليف قصيراً نسبياً . مع ان الليف غير الجيد يملك عرض نطاق محسن الا ان تخامده سيكون أكبر من ذلك الخاص بالألياف الأفضل .

حيث ان تشتيت المادة يكون مستقلاً عن اقتران الأساليب فان التعريض الذي تسببه هذه الآلية يتزايد خطياً مع طول المسار .

حالما يتم تحديد انبساط النبضة يمكن إيجاد معدلات معطيات الليف وعروض النطاق من المعادلات (3 ـ 16) و(3 ـ 19) و(3 ـ 20) و(3 ـ 21) . إذا كان التشوه الظاهري هو الغالب فتصبح بعض التعديلات ضرورية وذلك لأخذ اختلاط الأساليب في الاعتبار . مثلاً بتطبيق المعادلة (5 ـ 20) على التعبير $f_{3\text{-dB}}=(2\Delta\tau)^{-1}$ نجد أن :

$$f_{3\text{-dB}} = \frac{1}{2\,L\,\Delta(\tau/L)} \qquad (21\text{-}5)$$

من أجل مسارات أقصر من طول التوازن .

ونجد أن :

$$f_{3\text{-dB}} = \frac{1}{2\sqrt{(L\,L_e)}\;\Delta(\tau/L)} \qquad (22\text{-}5)$$

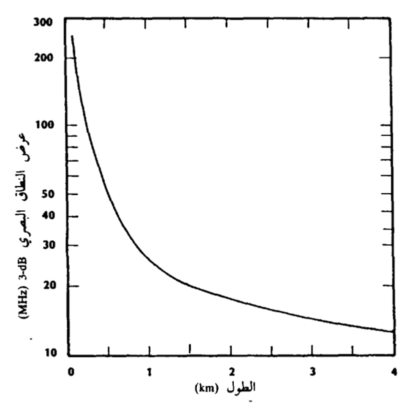
من أجل مسارات أطول . ان التصميم المحافظ سيتجاهل التبعية لـ L وسيستعمل ببساطة المعادلة (5 ـ 21) . ان هذا يمكن ان يكون ضرورياً إذا كان طول التوازن L_e غير معروف . يجب ان تستعمل المعادلة (5 ـ 21) إذا كان تشتيت المادة هو الغالب .

مثال :

احسب وارسم عرض النطاق 3 dB لليف SI متعدد الأساليب ذي انبساط نبضة خطي مقداره 20 ns/km وطول توازن يساوي 1 km .

الحل :

تعطي المعادلة (5 ـ 21) من أجل أطوالٍ أقصر من 1 km عرض نطاق أعظمي (القيمة عند 3 dB) مقداره 25/L MHz حيث : L تقدر بالكيلومتر . ومن أجل أطوال أكبر من 1 km تعطي المعادلة (5 ـ 22) القيمة $\sqrt{25/L}$ MHz . ان هاتين النتيجتين رسمتا في الشكل (5 ـ 22) .



شكل (5 ـ 22) ـ عرض النطاق البصري 3-dB لليف متعدد الأساليب ذي $\Delta(\tau/L)=20$ ns/km وطول توازن 1 km .

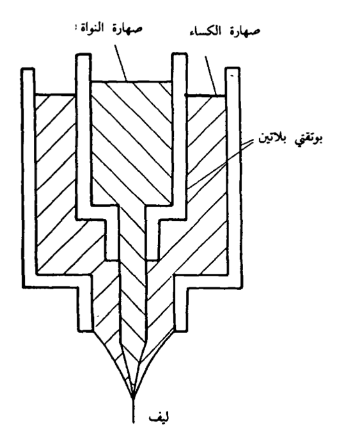
يعطي العديد من المصنعين في نشراتهم قائمة تتضمن جداء (الطول × التردد) مباشرة بدلاً من إعطاء انبساط النبضة لكل وحدة طول . قد لا يبدو واضحاً فيها إذا كان الموصوف هو عرض النطاق 3 dB البصري أو الكهربائي . ان عرض النطاق البصري هو أكبر من عرض النطاق الكهربائي كما تم مناقشته في الفقرة (3 ـ 2) .

(5 ـ 7) ـ انشاء الألياف البصرية Construction of Optic Fibers

استعمل عدد من التقنيات في تصنيع الألياف . سنقوم بوصف طريقة واحدة (البوتقة المزدوجة) لانتاج الألياف مباشرة وبوصف عدة طرق لانتاج تشكيلات أولية حيث تسحب الألياف من هذه التشكيلات باجراءات منفصلة .

طريقة البوتقة المزدوجة Double Crucible Method

يبين الشكل (5 ـ 23) طريقة البوتقة المزدوجة . يوضع زجاج النواة المنصهر في الوعاء الداخلي ويوضع زجاج الكساء المنصهر في الوعاء الخارجي . يخرج الزجاجان سوية عند قاعدة الحاوية الخارجية فتتشكل نواة مكسوة بالزجاج ويسحب هذا المزيج المنصهر ليشكل ليفاً . يبدو من النظرة الأولى أن تقنية



شكل (5 ـ 23) ـ عملية تصنيع الليف بالبوتقة المزدوجة .

البوتقة المزدوجة تنتج الألياف ذات الدليل الدرجي (SI) فقط إلا ان هذا ليس صحيحاً حيث يمكن انتاج الألياف المتدرجة (GRIN) وذلك بالسماح لكل من زجاج النواة والكساء بالانتشار البيني بعد التقائهما معاً . يسبب الانتشار تغيراً تدريجياً لدليل الانكسار بين ذلك الخاص بزجاج النواة وزجاج الكساء . ويمكن ، ببعض من الحرص ، إضافة الزجاج باستمرار إلى البوتقة مما يمكّن من الحصول على أطوال كبيرة من الليف المتصل .

السيليكا المطعمة بالتراكم Doped Deposited Silica

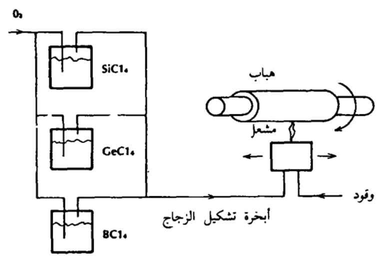
تتضمن عمليات التصنيع الأوسع استعمالاً تكوين تشكيلة ليفية مسبقة بواسطة تراكم بخاري لمكونات زجاجية . وتدعى هذه العملية بالسيليكا المطعمة بالتراكم (DDS) أو تراكم البخار الكيميائي (CVD) أو تأكسد الطور البخاري (VPO). تستعمل السيليكا كأساس وتضاف كميات صغيرة من مطعِّمات (مثل $Ge\ O_2$ و $B_2\ O_3$ و $P_2\ O_5$) من أجل انتاج تغيرات طفيفة في دليل الانكسار المطلوب . وسيكون للتشكيلة الاسطوانية الناتجة التغير المرغوب في دليل الانكسار إلا ان مساحة مقطعه تبلغ عدة مرات مساحة الليف النهائي . تبلغ أبعاد تشكيل نموذجي 1 m طولاً و 2 cm قطراً . وهذا القطر أكبر بـ 160 مرة من ليف له قطر كساء 125 μm . يمكن سحب ألياف متواصلة بطول عدة كيلومترات من تشكيلات بهذا الحجم .

سنقوم بوصف ثلاثة عمليات DDS وهي التراكم الخارجي والتراكم المحوري والتراكم الداخلي .

التراكم الخارجي External Deposition

يبين الشكل (5 ـ 24) طريقة المعالجة اللهبية (Flame Hydrolysis)ويطلق عليه اسم تراكم البخار الكيميائي الخارجي (CVD الخارجي) أو تأكسد الطور البخاري الخارجي (OVPO) أو تراكم البخار الخارجي (OVD) وربما تسميات أخرى أيضاً . تُأكسَد أبخرةُ المادة في اللهب . ويتحرك المشعل جانبياً فتتراكم

جسيمات الزجاج على قالب دوار وتشكل التراكمات طبقة مسحوق أو هباب على القالب وبعد اتمام التراكم تلبّد المادة ويزال القالب ويعالج الأنبوب الناتج حرارياً وذلك بالتسخين حتى درجات حرارة عالية بما فيه الكفاية من أجل تليينه إلى ان ينتج منه تشكيلة أولية صلبة .

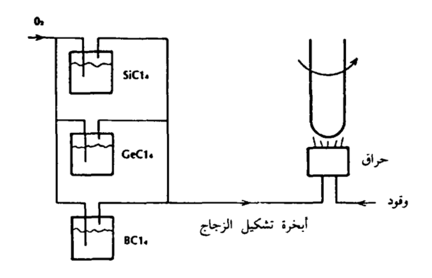


شكل (5 ـ 24) ـ تراكم بخار كيميائي خارجي .

التراكم المحوري Axial Deposition

يبين الشكل (5 ـ 25) التراكم المحوري وتعرف هذه العملية بتراكم البخار المحوري (AVD) أو التراكم المحوري البخاري (VAD) وهذا شكل آخر من التراكم الخارجي . يحدث التراكم في هذه الحالة على نهاية القالب الدوّار الذي يُسحب أثناء تزايد التشكيلة الأولية . يمكن انشاء تشكيلة نواة طويلة جداً بهذه الطريقة . يمكن تراكم الكساء على النواة بواسطة المعالجة اللهبية . وبالمقابل يمكن انشاء ليف مكسو وذلك بادخال تشكيلة النواة داخل أنبوب زجاجي ذي دليل انكسار أصغر ومن ثم سحب الليف من الأنبوب وهذا ما يعرف بتشكيلة (قضيب ضمن أنبوب) .

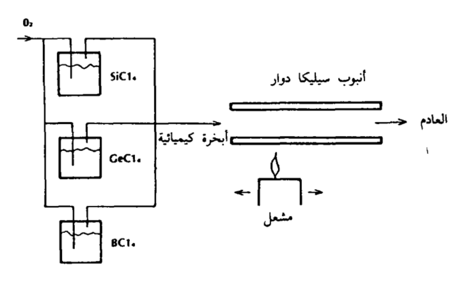
تنتج عملية (VAD) كلاً من ألياف SI وألياف GRIN . تنتج ألياف GRIN عندما تتغير كثافة الجسيمات المتراكمة بسبب تدرجات درجة الحرارة في المستوى المتعامد مع محور النواة .



شكل (5 ـ 25) ـ تراكم بخار محوري .

التراكم الداخلي Internal Deposition

يبين الشكل (5 ـ 26) عملية التراكم الداخلي وله تسميات مختلفة منها تراكم البخار الكيميائي الداخلي (CVD الداخلي) وتراكم البخار الكيميائي المعدل (MCVD) والتراكم البخاري الداخلي (IVD) . يتم في هذه العملية تراكم الأبخرة الكيماوية على داخل أنبوب زجاجي يدور في آلة خراطة زجاجية .

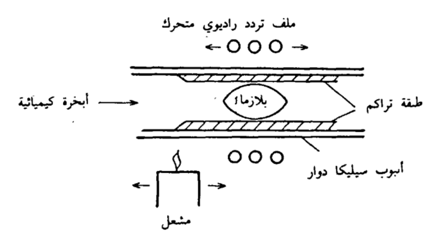


شكل (5 ـ 26) ـ تراكم بخار كيميائي معدَّل .

ويتحرك على طول الأنبوب مشعل أوكسيهيدروجيني يصهر المادة المتراكمة فتشكل غشاء زجاجياً شفافاً . وتتراكم طبقة فوق طبقة بمرور المشعل على طول الأنبوب بشكل متكرر . وتتراكم عادة من 30 إلى 100 طبقة . وبتغيير تركيز مادة التطعيم يمكن ان يتغير دليل الانكسار من طبقة إلى طبقة مكوناً مظهراً جانبياً ذا دليل متدرج . يمكن بواسطة هذه التقنية الحصول على تحكم دقيق جداً بالمظهر الجانبي .

يتم التراكم قبل ان يغلق الأنبوب ومن ثم يتحول الأنبوب حرارياً إلى تشكيلة أولية صلبة قبل سحبه ليفاً .

يمكن الحصول على معدل تصنيع أكبر باتباع طريقة MCVD المعزز بالبلازما (PCVD) المبينة في الشكل (5 ـ 27) . ان البلازما وهي منطقة غازات متأينة مسخنة كهربائياً تزيد معدلات التفاعل الكيميائي داخل الأنبوب فيجري التراكم بسرعة أكبر من سرعة طريقة MCVD التقليدية .

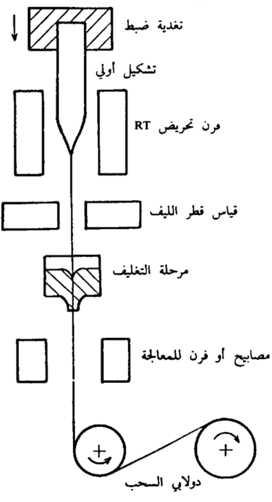


شكل (5 ـ 27) ـ تراكم البخار الكيميائي المعدّل المعزز بالبلازما . يتحرك كل من ملف التسخين RF والمشعل على طول الأنبوب بشكل مستقل الواحد عن الآخر .

سحب الليف Fiber Drawing

يتم سحب التشكيلات الأولية إلى ألياف بواسطة بنى كالمبينة في الشكل (5 ـ 28) توصل التشكيلة إلى تغذية دقيقة تحركها إلى داخل الفرن بسرعة

مناسبة . تصمم طريقة السحب بحيث تنتج أليافاً ذات تغيرات صغيرة في أقطارها بقدر الامكان . يقلل هذا من تخامد الليف إلى الحد الأدنى ويحسن قوته . تظهر أيضاً الحاجة إلى التحكم الدقيق بالقطر لكي تصبح الألياف متوافقة مع الموصلات الدقيقة المصممة من أجل خسارة توصيل قليلة . تتم خلال عملية السحب بشكل دائم مراقبة القطر بجهاز قياس دقيق مثل ميكرومتر ليزري . وكما يبدو على الشكل (5 ـ 28) يطبق غلاف على الليف مباشرة بعد



شكل (5 ـ 28) ـ نظام سحب ليف وتغليفه .

ان يكون قد تم سحبه وقياسه . ان الغلاف هو حاجز ضروري لحماية الليف من الرطوبة والتآكل . من مواد التغليف المناسبة نذكر الكينار (Kynar) والأيبوكسي (Epoxy) و RTV السيليكوني والريزين المعالج بفوق البنفسجية .

لأسباب اقتصادية يفضل أن يكون معدل السحب مرتفعاً ويعتبر معدل 1 m/s سريعاً نوعاً ما ويمكن إجراء السحب بسرعات أكبر وذلك باستعمال آلات سحب متخصصة .

السيليكا المكسوة بالبلاستيك Plastic-Cladded Silica (PCS)

يمكن تصنيع ألياف PCS بسحب تشكيلة أولية من سيليكا نقية بالطريقة المبينة بالشكل (5 ـ 28) . ان قسم التغليف المبين في الشكل يحتوي مادة الإكساء البلاستيكية وهي عادة RTV السيليكوني . ويفيد الكساء أيضاً كحاجز وقاية .

(5 ـ 8) ـ كابلات الألياف البصرية Optic Fiber Cables

يختلف مقدار الحماية المطلوبة لليف من تطبيق إلى آخر فمن أجل غايات مخبرية يستخدم الليف المحمي بغلاف واقٍ رقيق بينما يحتاج الليف المستخدم عبر البحار حماية كبيرة خلال النقل والتركيب والتشغيل . وقد اتبعت تصميمات متنوعة للكابلات لكي تفي بمتطلبات تطبيقات الليف المختلفة . سنناقش المشاكل المرافقة لحماية ليف بصري ونصف التقنيات المختلفة المستعملة بنجاح في حل هذه المشاكل ونبين بعض الكابلات المنتجة تجارياً كأمثلة .

يجب أن تحسن عملية تصنيع الكابلات الخواص الميكانيكية لليف من غير أن تسبب أي ضرر لخصائصه البصرية . وكما ذكر في الفقرة (5 ـ 3) يمكن ان تسبب عملية تصنيع الكابل انحناءات ميكروية في الليف مما يزيد في تخامده . يمكن أيضاً ان تحدث الانحناءات الميكروية عندما يتعرض الكابل لاجهاد نتيجة حركة من أي نوع (مثلاً عندما يلف الكابل على بكرة) . تصمم الكابلات بطريقة بحيث انها تقلل إلى الحد الأدنى الانحناءات الميكروية خلال الإنشاء وتحد من حدوثها فيما بعد .

نبين فيما يلي أنواع الدعم والحماية المطلوبة :

1 ـ قوة الشد Tensile strength : يطلب تحقيق قوة شد عالية عندما يتم تركيب الكابل بسحبه ضمن مجرى . يجب ان تتحمل عناصر الشد وزن الكابل عندما يعلق في مجرى شاقولي وعندما يعلق بين أعمدة وعندما يركب تحت المحيط . يجب ان تتحمل الكابلات المشدودة بين عمودين الاجهادات التي تسببها حمولات الجليد والريح .

2 ـ مقاومة التحطم Crush resistance: تتعرض الكابلات غالباً لقوى جانبية كبيرة يمكن ان تحطم ليفاً زجاجياً . يجب ان تحافظ الألياف في الكابلات على سلامتها حتى بعد ان تكون قد تعرضت لمرور سيارات كبيرة عليها .

3 ـ الحماية من الانحناءات المفرطة Protection from excess bending : تسبب الانحناءات الحادة مشكلتين : خسارة اشعاعية عند الانحناء والانقطاع الممكن في الليف . ان الكابل الجيد يجب ان يكون صلباً بما فيه الكفاية ليمنع الانحناء الزائد ويجب ان يكون مرناً بما فيه الكفاية من أجل سهولة التداول والتركيب .

4 ـ الحماية من التآكل Abrasion protection : ان الألياف الزجاجية تتلف بشدة إذا تعرضت للتآكل . يمكن للعيوب الصغيرة التي تسببها التآكلات ان تنتشر خلال الزجاج وتزيد الخسارات بشكل كبير .

5 ـ عزل الاهتزاز Vibration isolation : سيزيد الاهتزاز خسارات الليف . تصمم الكابلات بحيث انها تحضن الليف وتخمد الحركات المفرطة .

6 ـ الحماية الكيميائية ومن الرطوبة Moisture and chemical protection : تؤدي الرطوبة والكيماويات الى تدني نوعية الألياف الزجاجية بعد تعرضها لهذه المؤثرات لفترة طويلة . تحفظ بعض الكابلات الليف من التماس مع هذه المؤثرات .

بالإضافة إلى ان الكابلات قوية ومقاومة كيميائياً فان الكابلات الليفية الجيدة خفيفة الوزن وصغيرة ومرنة وبطيئة التأثر باللهب ومقاومة للقوارض وغير حساسة لدرجة الحرارة .

لقد طورت عدة أشكال بنيوية عامة لانتاج كابلات مناسبة . نورد من بينها ما يلي :

1 ـ الكابلات وحيدة الليف والكابلات متعددة الألياف .

2 ـ الألياف المحزومة المتراصة والألياف غير المحزومة .

3 ـ أعضاء تقوية (دعم) مركزية وأعضاء دعم خارجية .

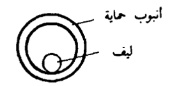
4 ـ أعضاء دعم عازلة وأعضاء دعم معدنية .

5 ـ بنى ذات أشكال هندسية دائرية وأشكال هندسية شريطية .

وسنناقش هذه الخيارات في الفقرات القادمة .

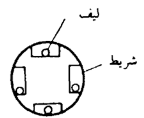
إذا كان المطلوب هو ليف واحد فقط فان الاختيار الأفضل هو بالتأكيد كابل وحيد الليف . في بعض الأمثلة يمكن ان تتحقق الاحتياجات المستقبلية من الناحية الاقتصادية بتركيب كابل متعدد الألياف حيث تستعمل الألياف الإضافية فيما بعد . ان كلفة نقل وتركيب كابل متعدد الألياف ليس أكثر بكثير من كلفة نقل وتركيب كابل وحيد الليف بالإضافة إلى انه في الكابل المتعدد الألياف يستغل الحيز بشكل أفضل وذلك لأن الألياف تشترك بأعضاء تقوية عامة . وبتزايد عدد الألياف في الكابل تتناقص الكلفة لكل ليف وتكون الكابلات متعددة الألياف مثالية من أجل وصلات شبكات الارسال حيث تسلك عدة رسائل المسار ذاته . تصمم من أجل أنظمة ارسال مزدوج الاتجاه كابلات ثنائية الليف بسيطة حيث يؤمن أحد الليفين الارسال في أحد الاتجاهين ويحمل الليف الآخر الإشارات في الاتجاه المعاكس .

كما لاحظنا سابقاً تغلف الألياف بغلاف واقٍ مباشرة بعد عملية سحبها ويمكن ان يحاط الليف المحمي كلياً بمادة مبطنة كخطوة تالية في عملية تجهيز الكابل ويمكن أن يستعمل البلاستيك اللين لهذه الغاية . تساعد البطانة في انقاص الانحناءات الميكروية إلى الحد الأدنى وتؤمن مقاومة ضد التحطم وعزلاً للاهتزاز إلا انها تضيف القليل إلى قوة الشد على الكابل . يوجد بديل للتبطين وهو كما يبينه الشكل (5 ـ 29) حيث يوضع الليف بوضع غير مقيد داخل أنبوب بلاستيك .



شكل (5 ـ 29) ـ بنية ذات أنبوب غير مقيد .

يمكن أن يكيف الليف نفسه داخل الأنبوب عندما يتغير شكل الكابل . ويمكن بهذه التقنية إلغاء الانحناءات الميكروية كلياً تقريباً ويمكن تحقيق الحماية ضد الرطوبة بوضع رغوة أو هلام داخل الأنبوب . في شكل آخر من البنية غير المقيدة يوضع الليف في شق كبير في عضو تقوية مركزي كما يبينه الشكل (5 ـ 30) .



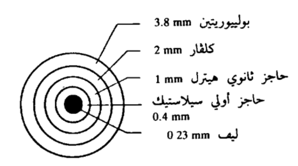
شكل (5 ـ 30) ـ بنية بشق ذات ليف غير مقيد .

يظهر في الشكل انه قد جهزت أربعة ألياف وان رباطاً يحيط بالنواة المشقوقة فتحفظ الألياف في أخاديدها . يمكن ان تنزلق الألياف بسهولة وحرية داخل الشقوق عندما يسحب الكابل أو يثنى أو يقوس . تكون عادة الكابلات ذات الألياف غير المقيدة أكبر حجماً من الكابلات ذات الألياف المقيدة .

تضاف عادة أعضاء التقوية إلى الكابلات الليفية لتساعدها في تحمل عملية السحب وتحمل اجهادات القص والانحناء . ان الأسلاك الفولاذية والألياف النسيجية هي المواد الأكثر شيوعاً لهذا الغرض . يجب ان تكون مواد الدعم قوية وخفيفة . ان الفولاذ قوي إلا انه أثقل من الألياف النسيجية ويستعمل الفولاذ في بعض الكابلات التجارية . ان الليف النسيجي Kelvar هو بوليمير قوي جداً وأحد مواد الدعم الأكثر استعمالاً . ان النسبة الفعالة لقوته

إلى وزنه هي تقريباً أربعة أضعاف تلك الخاصة بالفولاذ ، ويستعمل بشكل شائع كألياف تفتل وتجدل حول الليف المبطن المدعوم ويمكن أن يجدل أيضاً حول الأنبوب في النوع ذي الليف غير المقيد .

يستكمل الكابل المخصص للأغراض الخفيفة وذلك بإحاطة جديلة الكلفار بغلاف خارجي . يؤمن الغلاف حماية ضد القطع والتآكل وقد استعملت بنجاح في الكابلات التجارية كل من المواد التالية : بوليبوريتين و PVC و Hytrel . يبين الشكل (5 ـ 31) تمثيلاً لكابل للاستعمال الخفيف . يزن هذا الكابل 12.5 kg/km . ويمكن ان يُحنى بشكل سليم حتى نصف قطر



شكل (5 ـ 31) ـ كابل للاستعمال الخفيف . تمثل الأبعاد المبينة الأقطار .

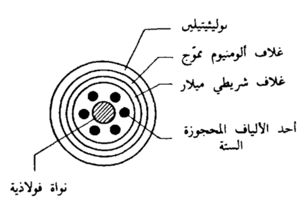
5 cm ويحتوي على ليف مقيد وعضو تقوية خارجي . يعني التعبير ـ خارجي ـ أي ليس في مركز الكابل . يمكن ان يتحمل الكابل المبين في الشكل حمولة شد مقدارها 400 N خلال التركيب ويمكن أن يحمّل حتى 50 N أثناء التشغيل . ان قوة الشد لكابل هي القوة المحورية المسموح بها . يمكن ان تعطى هذه القوة بإحدى الوحدات الثلاثة المختلفة : نيوتن أو كيلوغرام أو باوند . وترتبط القوة بالكتلة بقانون نيوتن الثاني :

$$F = m\,a \qquad (23\text{-}5)$$

وحيث ان تسارع الجاذبية الأرضية يساوي $9.8\ m/s^2$ نرى بأن 1 kg ينتج قوة مقدارها 9.8 نيوتن وان كتلة مقدارها $9.8^{-1}=0.102$ kg تنتج قوة مقدارها 1 نيوتن . نجد من ذلك ان حملاً مقداره 50 N للكابل في الشكل (5 ـ 31)

يساوي الاجهاد الذي تنتجه 50(0.102)=5.1 kg أو 50(0.225)=11.25 باوند على اعتبار ان : 1 N=0.225 lb .

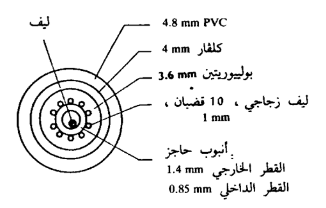
يبين الشكل (5 ـ 32) كابلاً آخر يحتوي ستة ألياف وعضو تقوية فولاذي مركزي . تؤمن النواة الفولاذية قوة كسر تبلغ تقريباً 5000 N ويتم حجز الألياف ودعمها افرادياً . يقدم التغليف الالومنيومي المّموج مقاومة ضد قوى الكسر والتسرب المائي . يبلغ القطر الخارجي لهذا الكابل 16.5 mm ويزن 185 kg/km . يمكن ان نضع في الفراغ بين الألياف وبين غلاف الميلار (Mylar) أسلاكاً نحاسية معزولة لكي تستعمل في إرسال الإشارات ذات المعدل المنخفض أو لنقل القدرة لمواقع بعيدة كما قد تتطلبه محطات التكرار البعيدة . يمكن أن



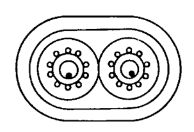
شكل (5 ـ 32) ـ كابل متعدد الألياف ذو عضو دعم مركزي وغلاف مسلح .

توضع في الاستخدام هذه الكابلات القوية جداً بواسطة معدات سحب تقليدية مصممة لتركيب خطوط النقل المعدنية .

نبين في الشكل (5 ـ 33) مثالاً لبنية أنبوبية غير مقيدة. تؤمّن التقوية بواسطة عشرة قضبان زجاجية ليفية منطمرة في البوليبوريتين . وفي الشكل (5 ـ 34) نرى نوعاً لكابل ثنائي الليف .



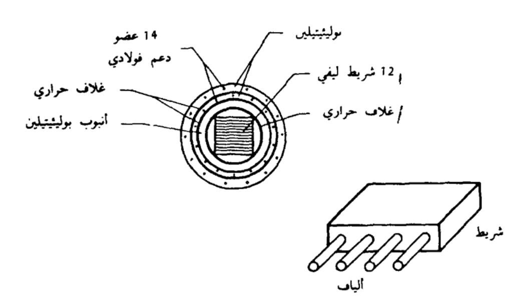
شكل (5 ـ 33) ـ كابل ذو أنبوب غير مقيد . الأبعاد المبينة هي للأقطار . يبلغ قطر الليف المغلف 0.153 mm .



شكل (5 ـ 34) ـ نوع ثنائي الليف ذو أنبوب غير مقيد للكابل في الشكل (5 ـ 33) .

ان الكابل الأخير الذي نرغب ان نقدمه يوضح البنية الشريطية وهو كما يبينه الشكل (5 ـ 35) وهذا الكابل مخصص للأنظمة الهاتفية حيث يحتاج الأمر إلى إرسال عدد كبير من الأقنية على طول مسارات مشتركة بين المقاسم الداخلية .

يتضمن كل شريط رفيع عدداً يصل حتى 12 ليفاً . وفي أحد الأنواع تحجز الألياف إفرادياً ضمن غلاف من البوليمر ومن ثم توضع في صفيف مسطح وتثبت في مكانها بوضعها بشكل شرائح بين طبقة سفلية وطبقة علوية من شريط لاصق وتميز الألياف بألوانها من أجل التعرف عليها . يصل عدد الأشرطة حتى 12 شريطاً كما يبدو على الشكل فينتج تركيبة مربعة تحتوي على 144 ليفاً .



شكل (5 ـ 35) ـ كابل شريطي ذو 144 ليفاً . يبلغ القطر الخارجي 12 mm . يبنى الشريط من تصفيف 12 ليف محمي بين شريطين لاصقين من البوليستر .

يُطمر في غلاف البوليثيتيلين المحيطي 28 عضو تقوية فولاذي خارجي فيَستغل هذا الكابل القوي بفعالية كبيرة الحيز الذي يشغله حيث يحتوي على 144 ليفاً ضمن قطر يبلغ 12 mm .

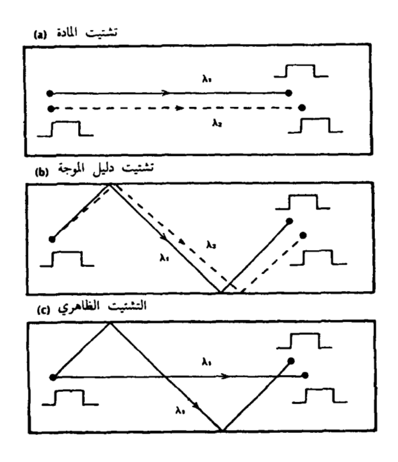
(5 ـ 9) ـ الخلاصة

ان معرفتك بمادة هذا الفصل تسمح لك باختيار الليف المناسب من أجل التطبيق الذي يخصك وان تعنى بسلوكه في نظامك . يمكن مبدئياً اختيار كل من الليف وبنية الكابل كلاً على حدى ويمكن ان يوضع أي ليف في أي من البنى المبنية في الفقرة (5 ـ 8) . لا يمكن ان يقدم المصنع عملياً جميع التشكيلات من الليف والكابل . وان تصاميماً وفق احتياجات محددة قد تكون خاصة جداً .

يوصف الأداء البصري لليف بتخميده وبانبساط النبضة وبفتحة النفوذ العددية . يعتبر التخامد في الليف في نظام محدود القدرة أكثر حرجاً من انبساط النبضة . تتعلق الـ NA مباشرة بكفاءة اقتران المنبع لذلك تكون ذات أهمية في

نظام محدود القدرة . ويمكن ان يكون الانبساط هو الاعتبار الأساسي في شبكات طويلة ذات معدل عالي ويمكن ان تأتي الخسارات في الدرجة الثانية من حيث الأهمية . يلخص الشكل (5 ـ 36) ظاهرة انبساط النبضة المتعلق بالمادة وبدليل الموجة وبتعدد الأساليب .

سنضع الآن قائمة بالخيارات التي توجد عند انتقاء ليف مناسب ونعلق عليها باختصار .



شكل (5 ـ 36) ـ وصف تخطيطي للعوامل الثلاثة التي تسهم في انبساط النبضة . في (a) ـ للنبضات ذات أطوال موجة مختلفة سرعات مختلفة . في (b) ـ نبضات بأطوال موجة مختلفة (إلا انها تنتشر في نفس الأسلوب) يجب ان تنتشر بزوايا مختلفة قليلاً فتنتج اختلافاً في السرعات المحورية النهائية . (c) ـ نبضة بطول موجة وحيد تتوزع قدرتها إلى أساليب تنتشر بسرعات محورية مختلفة بسبب الاختلافات في المسار .

1 ـ الألياف متعددة الأساليب ذات الدليل الدرجي SI والدليل المتدرج GRIN :

يمكن لألياف GRIN ان ترسل المعلومات بمعدلات أعلى من ألياف الـ SI . ويكون اقتران المنبع إلى الـ SI عادة أكثر فعالية بينها تكون الخسارات هي ذاتها لكلا النوعين . تصمم ألياف GRIN لأجل تشوه نبضة منخفض مما يجعلها مناسبة من أجل المسافات الطويلة والتطبيقات ذات المعدل العالي .

2 ـ الانتشار متعدد الأساليب ووحيد الأسلوب :

ستعمل معظم الأنظمة بشكل ملائم بالألياف متعددة الأساليب وهي أكبر حجماً وأقل كلفة من الألياف وحيدة الأسلوب . ان ميزة الألياف وحيدة الأسلوب هي سعة المعلومات العالية لها الناتجة عن غياب انبساط النبضة الظاهري . يمكن للأنظمة الطويلة وذات سعة المعلومات الكبيرة اَن تستخدم هذه الألياف بشكل اقتصادي .

3 ـ المواد :

ان الخيارات في هذه الفئة هي الزجاج والزجاج المكسو بالبلاستيك والبلاستيك . ان للزجاج أقل تخميد مما يرجح استعماله من أجل المسافات الطويلة . ومع أن ألياف PCS ذات خسارات أكبر فان فتحات نفوذها العددية أكبر مما يجعل الاقتران أكثر فعالية . تستعمل ألياف PCS للمسافات المعتدلة الطول . أما الألياف البلاستيكية فهي ذات خسارات عالية وعلى أي حال فان نواها الكبيرة وفتحات نفوذها الكبيرة تجعلها مناسبة وفعالة من أجل المسافات القصيرة .

4 ـ طول موجة التشغيل :

أثبت العمل في مدى طول الموجة القصير (من 800 nm إلى 900 nm) انه عملي جداً فالخسارات وانبساطات النبضة قليلة بما فيه الكفاية من أجل انتاج

أنظمة المسافات الطويلة وذات المعدل المرتفع . ان المنابع والمكاشيف في هذا المدى متوفرة . وفي المدى ذي طول الموجة الأطـول (من 1300 nm إلى 1600 nm) ينخفض كل من التخامد والتشتت ويكون العمل في هذه النافذة الثانية جذاباً جداً للوصلات ذات المسافات الطويلة والمعدل العالي جداً .

لقد قدمنا عدداً من المواضيع التي مهّد لها في ملخصات الفصول الأولية وبحثنا بشكل خاص في اختيار طول موجة العمل ومواصفات الليف والكابل المناسبين وكذلك المواضيع التي ظهرت في الفقرة (1 ـ 6) . وكما اقترح في الفقرة (2 ـ 6) فقد درسنا كيف ينتشر الضوء في ليف ما وكذلك كيفية تحديد NA الخاصة بالليف .

لقد أوردنا في الجدول (5 ـ 2) القيم العددية الممثلة للخصائص المهمة للألياف المختلفة المعرّفة في هذا الفصل . وقد أنتج تجارياً من كل صنف عدد من التصاميم وهكذا نجد بعض الخواص المختلفة عندما نبحث في النشرات الفنية للجهات المصنّعة عن ألياف محددة . يفيد الجدول كمرشد ومن أجل الأمثلة العددية التي وردت في الفصول الأخيرة . من تفسيرنا للجدول نرى بأن المعادلة (3 ـ 16) قد استعملت لتربط عرض النطاق 3 dB مع انبساط النبضة . يمكن الحصول على معدل المعطيات من المعادلة (3 ـ 20) أو المعادلة (3 ـ 21) . لقد أوردنا في الجدول طول الموجة وذلك لأن كلاً من التخامد والتشوه يتغيران بتغيره . وقد أوردنا أيضاً نوع المنبع . تناسب عموماً منابع الـ LED ألياف الـ SI متعددة الأساليب حيث يغلب فيه التشوه الظاهري . وسوف لن يؤدي استعمال ثنائيات ليزر ضيقة النطاق إلى تخفيض الانبساط الاجمالي بشكل كبير . وعندما يكون تشتيت المادة هو الغالب كما هو الحال في ليف وحيد الأسلوب أو GRIN يتناقص الانبساط حتى الحد الأدنى باستعمال منبع LD .

وفي المنطقة ذات طول الموجة الطويل يصبح تشتيت المادة مهملاً وهكذا تصبح منابع الـ LED مناسبة . لاحظ عدم وجود معطيات عن عرض النطاق

من أجل الليف البلاستيكي . ان الأبعاد التي يكون عندها هذا الليف عملياً تكون صغيرة لدرجة ان انبساط النبضة لا يشكل على العموم مشكلة .

جدول (5 ـ 2) ـ الخواص الممثلة للألياف التجارية

الوصف	قطر النواة µm	NA	الخسارة dB/km	$\Delta(\tau/L)$ ns/km	$f_{3-dB} \times L$ MHz×km	المنبع	طول الموجة nm
متعدد الأسلوب							
زجاج							
SI	50	0.24	5	15	33	LED	850
GRIN	50	0 24	5	1	500	LD	850
GRIN	50	0.20	1	0.5	1000	LED,LD	1300
PCS							
SI	200	0.41	8	50	10	LED	80
بلاستيك							
SI	1000	0.53	400	——	——	LED	580
وحيد الأسلوب							
زجاج	5	0.10	4	<0.5	>1000	LD	850
زجاج	10	0.10	0.6	0.017	30000	LD	1300
زجاج	10	0.10	<1	<0.02	>25000	LD	1550

مسائل الفصل الخامس

5 ـ 1 ـ يبلغ القطر الخارجي لليف سيليكا 100 μm . ما هو الحجم الكلي لطول 1 km من هذا الليف ؟ يلف هذا الليف على بكرة قطرها 20 cm وارتفاعها 10 cm احسب قطر البكرة الكلي بعد اللف .

5 ـ 2 ـ كرر حسابات المسألة (5 ـ 1) إذا كان الليف متضَمَّناً في كابل ذي قطر خارجي مقداره 1 mm .

5 ـ 3 ـ في ليف ذي دليل درجي SI : $n_1=1.5$ و $n_2=1.49$ وقطر النواة = 50 μm . اعتبر ان الشعاع الموجَّه يسير وفق الزاوية الأكثر انحداراً بالنسبة لمحور الليف . فكم عدد الانعكاسات من هذا الشعاع لكل متر ؟

5 ـ 4 ـ ارسم بيانياً زاوية القبولة بدلالة فتحة النفوذ العددية NA للمدى $0 \leqslant NA \leqslant 1$ بافتراض أن : $n_0=1$.

5 ـ 5 ـ برهن أن :

$$\cos \Theta_c = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_1}$$

مبتدئاً بالمعادلة (5 ـ 1) .

5 ـ 6 ـ في ليف متدرج (GRIN) ، ليكن : $n_1=1.5$ و $\Delta=0.01$ و $\alpha=2$ و $a=50\ \mu m$.

أ ـ ارسم بيانياً بمقياس رسم $n\ (r)$ ضمن النواة .

ب ـ كرّر ما سبق على نفس الرسم بعد تغيير α إلى 10 .

جـ ـ كرّر ما سبق على نفس الرسم بعد تغيير Δ إلى 0.001 وباعتبار $\alpha=2$.

5 ـ 7 ـ ضع نموذجاً لليف GRIN قطع مكافىء بواسطة التقريب المكافىء متعدد الدرجات . لتكن $n_1=1.5$ و $\Delta=0.01$ وقسّم نصف القطر إلى عشرة أقسام متساوية . واعتبر شعاعاً داخل الليف يقطع محوره بزاوية $5°$ بالنسبة لذلك المحور . ارسم مسار الشعاع خلال الليف حتى يعود ويقطع محوره من جديد . وعند أي قيمة لـ r/a يرجع الشعاع .

5 ـ 8 ـ في المسألة (5 ـ 7) افترض ان زاوية الشعاع البدائية قد ازدادت عن $5°$. ما هي الزاوية العظمى التي يتوقف عندها حدوث الانعكاس ؟ ارسم الشعاع الذي يسير عند هذه الزاوية العظمى .

5 ـ 9 ـ اعتبر ليفاً ذا دليل نواة يساوي 1.5 ودليل كساء يساوي 1.485 ونصف قطر النواة يساوي $100\ \mu m$. عند أي نصف قطر انحناء يصدم شعاعٌ ، يسير على طول محور الليف ، الكساءَ عند الزاوية الحرجة في هذا الانحناء ؟

5 ـ 10 ـ اعتبر ليف SI ذا : $n_1=1.5$ و $n_2=1.485$ عند $\lambda=0.82\ \mu m$. إذا كان نصف قطر النواة $50\ \mu m$ فكم عدد الأساليب التي يمكن أن تنتشر ؟ كرّر ما سبق إذا تغير طول الموجة إلى $1.2\ \mu m$.

5 ـ 11 ـ برهن أن القيمة العظمى لـ a/λ بالنسبة لليف ذي دليل قطع مكافىء وحيد الأسلوب هي أكبر بـ 1.6 مرة مما لليف SI وحيد الأسلوب .

5 ـ 12 ـ في ليف قطع مكافىء ارسم بيانياً وعلى نفس المخطط الأنماط العرضية للأساليب (0 ، 0) و(0 ، 1) و(0 ، 2) . بافتراض أن : $a=25\ \mu m$ و $\lambda=0.82\ \mu m$ و $n_1=1.48$ و $n_2=1.46$.

5 ـ 13 ـ في ليف قطع مكافىء احسب المعادلة من أجل قيمة القطع لـ a/λ للأسلوب (5 ، 5) . إذا كان يسمح ان تنتشر جميع الأساليب ولغاية هذا الأسلوب . فكم عدد الأساليب المسموح بها ؟ قارن نتيجتك بالعلاقة : $N=V^2/4$.

5 ـ 14 ـ اعط معادلة عامة لقيمة القطع لأسلوب (p, q) في ليف القطع المكافىء .

5 ـ 15 ـ في ليف GRIN وحيد الأسلوب ومتعدد الأساليب : $n_1=1.48$ و $n_2=1.46$ و $\lambda=0.82\ \mu m$ وعرض الخط يساوي 20 nm .

أ ـ احسب حاصل جداء عرض النطاق بالطول . اهمل تشتيت دليل الموجة .

ب ـ كرِّر الحساب إذا كان عرض الخط 1 nm .

ت ـ كرِّر الجزء (أ) إذا كان : $\lambda=1.5\ \mu m$ وعرض الخط 50 nm .

ث ـ كرِّر الجزء (أ) إذا كان : $\lambda=1.5\ \mu m$ وعرض الخط 1 nm .

5 ـ 16 ـ ليف SI وحيد الأسلوب عند $\lambda=1.4\ \mu m$ وليس عند الموجات الأقصر . إذا كان : $n_1=1.465$ و $n_2=1.46$ فاحسب نصف قطر النواة . وأوجد عدد الأساليب عند أطوال موجة : $0.8\ \mu m$ و $0.85\ \mu m$ و $0.9\ \mu m$. (ملاحظة : استعمل مخطط الأسلوب) .

5 ـ 17 ـ لليف متعدد الأساليب طول توازن يساوي 0.5 km . وانبساط نبضته لوحدة الطول في المنطقة الخطية يساوي 30 ns/km . ويعود الانبساط

مبدئياً إلى التشويه الظاهري . ارسم بيانياً عرض النطاق البصري الـ (3-dB) وعرض النطاق الكهربائي الـ (3-dB) بدلالة طول ليف من صفر إلى 5 km . وارسم بيانياً معدلات البيانات RZ و NRZ أيضاً .

5 ـ 18 ـ ارسم بيانياً انبساط النبضة لكل وحدة طول وحاصل جداء عرض النطاق الـ (3-dB) بالطول مقابل عرض الخط لليف SI وحيد الأسلوب عند : $\lambda=1.5\ \mu m$ مضمِّناً رسمك تشتيت المادة وتشتيت دليل الموجة .

المراجع

الفصل الخامس

1. D. Gloge. "Weakly Guiding Fibers." *Appl. Opt.* 10, no. 10 (October 1971): 2252-58.
2. D. Gloge and E. A. J. Marcatili. "Multimode Theory of Graded-Core Fibers." *Bell Syst. Tech. J.* 52 (Now. 1973): 1563-78.
3. John E. Midwinter. *Optical Fibers for Transmission*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1979. pp. 128-61.
4. Donald B. Keck. "Optical Fiber Waveguides." In *Fundamentals of Optical Fiber Communications*. 2d ed., edited by Michael K. Barnoski New York: Academic Press, Inc., 1981. p. 18.
5. Gloge. "Weakly Guiding Fibers." p. 2256.
6. Dietrich Marcuse. *Light Transmission Optics*. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1972. pp. 263-72.
7. A. K. Ghatak and K. Thyagarajan. *Contemporary Optics*. New York: Plenum Press, 1978. pp. 301-8.
8. Gloge. "Multimode Theory of Graded-Core Fibers." pp. 1565-69.
9. Stewart E. Miller, Enrique A. J. Marcatili, and Tingy Li. "Research Toward Optical Fiber Transmission Systems." *Proc. IEEE* 61, no. 12 (December 1973): 1703-51.
10. Keck. "Optical Fiber Waveguides." p. 63.
11. Miller. "Research Toward Optical-Fiber Transmission Systems." p. 17.
12. Midwinter. *Optical Fibers for Transmission*. pp. 166-78.
13. Michael G. Blakenship and Charles W. Deneka. "The Outside Vapor Deposition Method of Fabricating Optical Waveguide Fibers." *IEEE J. Quantum Electron.* 81, no. 10 (October 1982): 1418-23.
14. Koichi Inada. "Recent Progress in Fiber Fabrication Techniques by Vapor-Phase Axial Deposition." *IEEE J. Quantum Electron.* 18, no .10 (October 1982): 1424-31.
15. Suzanne R. Nagel, J. B. MacChesney, and Kenneth L. Walker. "An Overview of the Modified Chemical Vapor Deposition (MCVD) Process and Performance." *IEEE J. Quantum Electron.* 18, no. 4 (April 1982). pp. 459-76.
16, Frank J. Dezelsky, Robert B. Sprow and Francis J. Topolski. "Lightguide Packaging." *The Western Electric Engineer* XXIV, no. 1 (Winter 1980): 80-85.

الفصل السادس

منابع الضوء Light Sources

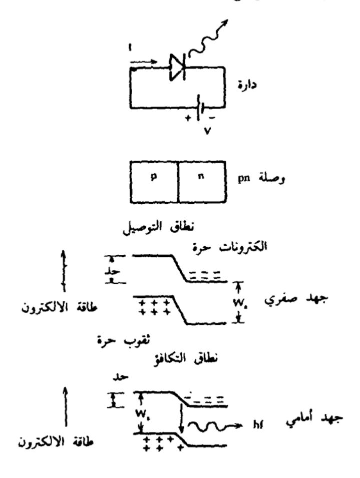
تقوم الحزم البصرية التي تولدها المنابع الضوئية في الأنظمة الليفية بحمل المعلومات وتعتبر الثنائيات الليزرية والثنائيات الباعثة للضوء المنابع الأكثر شيوعاً . فأحجامها الصغيرة تتوافق مع الأقطار الصغيرة للألياف وتتوافق كذلك بنيتها المتينة ومتطلبات الطاقة البسيطة لها مع الالكترونيات الحديثة . وفي معظم الأنظمة تُحمَّل المعلومات على الحزمة بواسطة تعديل تيار دخل المنبع . ان التعديل الخارجي ممكن الا إننا لن نؤكد عليه بسبب قلة أهميته . تتضمن دراستنا لمنابع الـ LED والـ LD أسس التشغيل وخواص النقل والتعديل . سنعمل للحصول على فكرة جيدة عن الفروق بين النوعين وعن الحالات التي تستدعي استخدام النوع الأول أو النوع الثاني .

(6 ـ 1)ـ الثنائيات الباعثة للضوء

Light-Emitting Diodes (LED)

إن الثنائي الباعث للضوء هو وصلة pn من مادة نصف ناقلة تبعث ضوءاً عندما تُستقطب أمامياً . يبين الشكل (6 ـ 1) الوصلة ورمز الدارة ونطاقات

الطاقة المرتبطة بالثنائي . تقدم نظرية النطاق توضيحاً بسيطاً لعمل باعث (ومكشاف) نصف ناقل . يبين الشكل نطاقي طاقة مسموح لهما تفصلهما منطقة ممنوعة (ثغرة نطاق) ذات عرض له طاقة مقدارها Wg . ان الالكترونيات في



شكل (6 ـ 1) ـ الثنائي الباعث للضوء . تدل إشارتي + و- على ثقوب حرة والكترونات حرة على التوالي .

سوية القدرة الأعلى المسماة نطاق التوصيل وغير المرتبطة مع ذرات معينة تكون حرة في ان تتحرك وكذلك في السوية الأدنى المسماة نطاق التكافؤ تكون الثقوب غير المقيدة حرة في أن تتحرك أيضاً . تملكِ الثقوب شحنة موجبة وتوجد في مواقع حيث كـان قد سحب الكترون واحد من ذرة محايدة فتترك الذرة بشحنة موجبة . يمكن للالكترون الحر أن يتحد ثانية مع الثقب فتعود الدارة إلى حالتها الحيادية وعندما يحدث هذا تتحرر الطاقة . تملك مادة نصف ناقلة نوع n عدداً

من الالكترونات الحرة كما يبينه الشكل (6 ـ 1) . وتملك مادة نصف ناقلة نوع p عدداً من الثقوب الحرة . عندما تُوصَل مادة نوع n إلى مادة نوع p ينتج ما يسمى بحاجز طاقة كما يظهر على الشكل . لا تملك الالكترونات الحرة في المنطقة n الطاقة الكافية لكي تجتاز الحاجز وتنتقل إلى المنطقة p . وبالمثل لا تملك الثقوب الطاقة الكافية لكي تتغلب على الحاجز . ان الطاقة الكامنة للثقوب المعاكسة لتلك الخاصة بالالكترونات تتزايد في الاتجاه نحو الأسفل في الشكل . إذا طبقنا على الثنائي جهداً مقداره صفر فولت فلا تحدث حركة شحنات . يؤدي الجهد الأمامي إلى تناقص الحاجز فيرفع الطاقة الكامنة للجانب n وينقص الطاقة الكامنة للجانب p . كما يشير اليه الرسم الأسفل في الشكل (6 ـ 1) ب تملك الآن كل من الالكترونات الحرة والثقوب الحرة الطاقة الكافية لكي تتحرك في منطقة الاتصال . عندما يتقابل الكترون حر مع ثقب حر يمكن للالكترون ان يقع في نطاق التكافؤ ويتحد ثانية مع الثقب . تتحول الطاقة المفقودة في هذا العبور إلى طاقة بصرية على شكل فوتون . وبأبسط التعابير نقول ان الاشعاع من LED يتسبب من إعادة تجميع ثقوب والكترونات كانت قد حقنت في الوصلة بواسطة جهد انحياز أمامي .

وكما ورد في المعادلة (4 ـ 1) ترتبط طاقة الفوتون بالتردد بالعلاقة W=hf ويكون طول الموجة المشعَّة حينئذٍ كما يلي :

$$\lambda = \frac{hc}{Wg} \qquad (1\text{-}6)$$

وتقدر طاقة الثغرة بالجول وطول الموجة بالمتر . أما إذا قدرنا طاقة الثغرة بالالكترون ڤولت وطول الموجة بالميكرومتر فان المعادلة (6 ـ 1) تصبح على الشكل التالي :

$$\lambda = \frac{1.24}{Wg} \qquad (2\text{-}6)$$

تملك المواد المختلفة والسبائك طاقات نطاق ثغرة مختلفة . يبين الجدول (6 ـ 1) المواد الباعثة الشائعة وأطوال موجة العمل والطاقات التقريبية لنطاق الثغرة . لم يرد ذكر السيليكون وذلك لان ثقوبه والكتروناته لا تتحد من جديد

مباشرة مما يجعله باعثاً غير فعال . يمكن اختيار طول موجة العمل من أجل العناصر Al Ga As و In Ga As و In Ga As P وذلك بتغيير نسب الذرات المكونة . ان هذا يغير طاقة نطاق الثغرة وكذلك طول موجة الانبعاث وفقاً للمعادلة (6 ـ 2) .

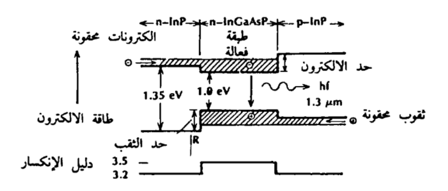
جدول (6 ـ 2) ـ أنصاف نواقل باعثة للضوء

طاقة نطاق الثغرة eV	مدى طول الموجة μm	المادة
1.4	0.9	Ga As
1.4 - 1.55	0.8 - 0.9	Al Ga As
0.95 - 1.24	1.0 - 1.3	In Ga As
0.73 - 1.35	0.9 - 1.7	In Ga As P

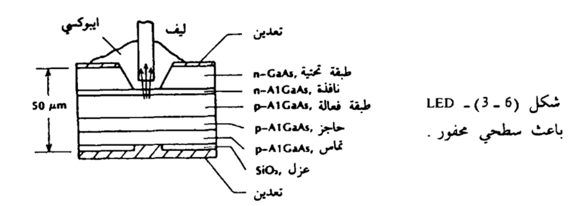
يوضح الشكل (6 ـ 1) حالة وصلة متجانسة وهي وصلة pn مشكلة من نصف ناقل وحيد . ان LED ذا وصلة متجانسة لا يحجز إشعاعه المنبعث بشكل جيد جداً . فتشع الفوتونات من حواف الوصلة ومن سطحه المستوي الواسع . وهذا يجعل الاقتران مع الليف الصغير غير فعال بشكل جيد . يمكن تمييز سببين لهذا السلوك : أولاً تتواجد حاملات الشحنة فوق مساحة واسعة فتسبب حدوث إعادة الاتحاد والانبعاث فوق مساحة كبيرة . وثانياً وبعد أن تتولد الفوتونات تتفرق فوق مسارات غير محددة . ان هذه المشاكل قد حلّت بواسطة LED ذي الوصلة غير المتجانسة (المتغايرة) Heterojunction LED المبينة في الشكل (6 ـ 2) . ان الوصلة غير المتجانسة هي وصلة مشكّلة من أنصاف نواقل غير متشابهة . ان لكل من المادتين طاقتي نطاق ثغرة مختلفتين ودليلي انكسار مختلفين . يخلق التغير في طاقات نطاق الثغرة حواجز كمون لكل من الثقوب والالكترونات . تستطيع الشحنات الحرة فقط أن تتقابل وتتحد في الطبقة الفعالة المحدودة والضيقة . وحيث ان المنطقة الفعالة تتمتع بدليل انكسار أعلى من أدلّة

الانكسار للمواد على أي من الجانبين فيتشكل بالتالي دليل موجة بصري . وهذا هو بالتحديد دليل الموجة الطبقي العازل الذي درس في الفصل الرابع . تحفظ انعكاسات الزاوية الحرجة الفوتونات في المنطقة الفعالة فتخلق مساحة صغيرة ذات شدة عالية . يحسّن الانبعاث المحصور كفاءة الاقتران وخصوصاً من أجل الألياف الصغيرة .

يمكن قرن القدرة إلى الليف من السطح المستوي لطبقة باعثة أو من حوافها . ان القارن السطحي الأكثر فعالية هو ما يسمى (بورَس) Burrus أي تركيبة الحفرة المبينة في الشكل (6 ـ 3) . يبث الثنائي Al Ga As المبين عادة عند 0.82 μm حيث يكون تخامد الألياف الزجاجية ضعيفاً . لاحظ طبقة SiO_2 العازلة والغلاف المعدني عند قعر الثنائي . يمتد التماس المعدني الدائري من خلال ثقب إلى طبقة SiO_2 ويحصر هذا التركيب الشحنات المحقونة في جزء مركزي صغير للثنائي . يمكن تحقيق اقتران فعال نسبياً بألياف صغيرة تصل حتى 50 μm بسبب مساحة الانبعاث المحدودة . ان معظم الاشعاع المنبعث سيصدم على الأقل نواة الليف . إلا أنه لن تجمع القدرة كلياً بواسطة الليف بسبب فتحة نفوذه العددية المحدودة .

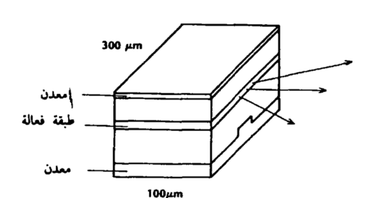


شكل (6 ـ 2) ـ باعث ذو وصلة غير متجانسة . تمثل المناطق المهشرة سويات الطاقة للشحنات الحرة . تشكل الوصلة على اليمين حاجز طاقة يمنع الالكترونات من العبور إلى المنطقة p . تمنع الوصلة على اليسار الثقوب من العبور إلى المنطقة n . تحدث إعادة الاتحاد فقط في طبقة الـ In Ga As P الفعالة. يبث هذا الثنائي عند 1.3 μm .



شكل (6 ـ 3) ـ LED باعث سطحي محفور .

يبين الشكل (6 ـ 4) ثنائياً ذا حواف باعثة . يشع هذا الجهاز ضمن مخروط أصغر مما يقدمه ثنائي بورَس Burrus . تكون المساحة الباعثة مستطيلة الشكل وليست دائرية . تبلغ ثخانة المنطقة الباعثة بضعة ميكرونات ويبلغ عرضها بضعة عشرات الميكرونات . وبغية التبسيط لم تسم الطبقات المختلفة بوضوح في الشكل (6 ـ 4) . يحد التماس الشريطي المعدني حوامل الشحنة في الاتجاه الجانبي وتحصر الوصلات غير المتجانسة هذه الحوامل في الاتجاه الشاقولي . توجه الوصلات غير المتجانسة الموجة باتجاه الطرف الباعث لجهاز الـ LED فتمنع التسرب خلال السطح المستوي .

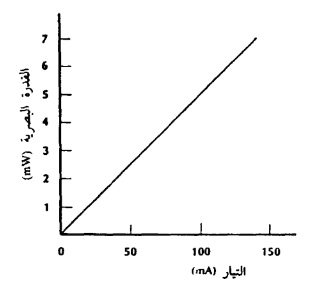


شكل (6 ـ 4) ـ ثنائي ذو حواف باعثة .

(6 ـ 2) ـ خواص العمل للثنائي الباعث للضوء
LED Operating Characteristics

تتناسب القدرة البصرية التي يولدها الـ LED خطياً مع التيار الأمامي .

يبين الشكل (6 ـ 5) منحنى نموذجياً لذلك ويمكن فهم العلاقة الخطية بالتعليل التالي : ان التيار i هو الشحنة المحقونة بالثانية . يكون حينئذٍ عدد الشحنات



شكل (6 ـ 5) ـ علاقة القدرة ـ التيار لجهاز LED .

بالثانية N=i/e حيث e هي شحنة الالكترون . فإذا كان η هو الجزء من هذه الشحنات الذي سيتحد وينتج فوتونات سيكون خرج القدرة البصرية عندئذ هو :

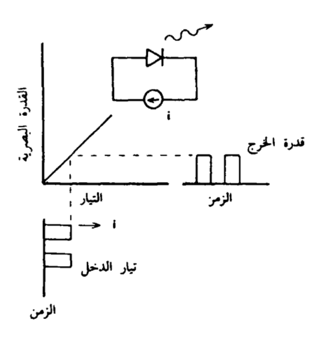
$$P = \eta N W_g = \frac{\eta W_g}{e} i \qquad (3\text{-}6)$$

مبرهناً العلاقة الخطية بين القدرة البصرية والتيار . في هذه النتيجة تقدر طاقة الثغرة بالجول . إذا قدرت الطاقة بالالكترون فولت تبسط المعادلة حينئذٍ إلى :

$$P = \eta\, i\, W_g \qquad (4\text{-}6)$$

أما الانحرافات عن الخطية التامة ستناقش في الفقرة (10 ـ 1) . ان القدرة في الشكل (6 ـ 5) ليست هي القدرة المتوفرة داخل الليف وان فتحة النفوذ العددية المحدودة لليف تخفض بشكل كبير مقدار القدرة المنقولة إليه (سنقوم بتحديد كفاءة الاقتران في الفقرة 8 ـ 5).تتوفر مجموعة من أجهزة LED تعمل عادة في المدى من 50 mA إلى 100 mA وتتطلب جهداً يتراوح بين 1.2 V و 1.8 V .

يبين الشكل (6 ـ 6) التعديل الرقمي حيث يعدَّل الثنائي بواسطة تيار ينقله ببساطة بين حالتي الوصل والقطع. أما الشكل (6 ـ 7) فإنه يبين تعديلاً



شكل (6 ـ 6) ـ تعديل رقمي لجهاز LED .

تماثلياً حيث يتطلب ذلك تيار انحياز مستمر لكي يحفظ التيار الكلي دائماً في الاتجاه الأمامي . ومن دون التيار المستمر سيؤدي تأرجح سالب في تيار الإشارة إلى انعكاس انحياز الثنائي فيقوده إلى حالة القطع .

يساوي التيار الكلي للثنائي ما يلي :

$$i = I_{DC} + I_{SP} \sin \omega t \qquad (5\text{-}6)$$

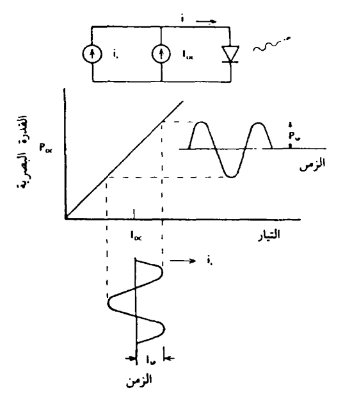
وتساوي قدرة الخرج البصرية عندها ما يلي :

$$P = P_{DC} + P_{SP} \sin \omega t \qquad (6\text{-}6)$$

حيث P_{SP} هي قدرة الذروة للإشارة وسندعوها القدرة المتناوبة (AC) . لاحظ كيف ان شكل موجة القدرة البصرية يطابق شكل تغير تيار الدخل بسبب العلاقة الخطية بين التيار والقدرة . ان الانحراف عن الخطية يشوه الإشارة

وعندما يتطلب الأمر أن يكون التشوه صغيراً جداً يجب عندئذٍ تقويم خطية المنبع المقترح .

لقد ناقشنا في الفصول السابقة كيف يحد الانتشار في الألياف معدل المعلومات . ويمكن ان يحد المنبع أيضاً سعة النظام . عند ترددات تعديل منخفضة يكون $P_{SP}=\alpha\ I_{SP}$ حيث : $\alpha=\Delta P/\Delta i$ (ميل المنحنى في الشكل 6 ـ 7) . وعند الترددات الأعلى تعمل سعات الوصلة والسعات الطفيلية على إحداث قصر على التيار سريع التغير مما ينقص قيمة القدرة المتناوبة . على أي حال يكون المحدد الرئيسي للتعديل عالي التردد هو زمن حياة الحامل τ



شكل (6 ـ 7) ـ تعديل تماثلي لـ LED هو I_{DC} هو تيار الانحياز المستمر و I_s هو تيار الإشارة . P_{sp} هو اتساع الدروة للجزء المعدل من قدرة الخرج .

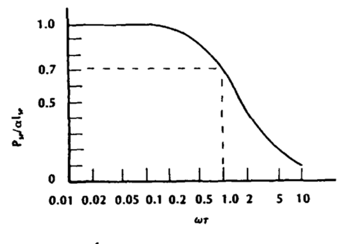
carrier lifetime وهو الزمن الوسطي المطلوب من أجل ان تتحد الشحنات المحقونة . ويجب ان يتغير تيار التعديل ببطء بالمقارنة مع τ . تعطى استجابة الـ LED المحدودة بزمن حياة الحامل لإشارات كهربائية ذات تردد راديانى ω بالعلاقة التالية :

$$P_{SP} = \frac{\alpha\ I_{SP}}{\sqrt{(1+\omega^2\ \tau^2)}} \qquad (6\text{-}7)$$

يبين الشكل (6 ـ 8) رسماً للمعادلة (6 ـ 7) . عند تردد مقداره $\omega=1/\tau$ تنخفض القدرة المتناوبة بقيمة العامل 0.707 . وعند طرف المستقبل يتناسب التيار الذي يولده المكشاف مع القدرة البصرية ، لذلك عندما تنخفض القدرة البصرية بالمقدار 0.707 سينخفض التيار المكشوف بهذا المقدار وستنخفض القدرة الكهربائية عند المستقبل (التي تتناسب مع مربع التيار) بنسبة $0.707^2=0.5$ (أي بمقدار 3 dB) . لهذا السبب ندعو $1/\tau$ عرض نطاق التعديل 3 dB للعنصر LED أو عرض نطاقه الكهربائي 3 dB . وفي وحدات الهرتز يكون عرض النطاق 3 dB هو :

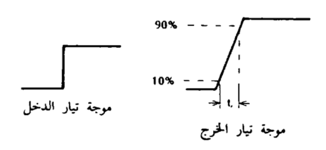
$$f_{3\text{-}dB} = \frac{1}{2\pi\tau} \qquad (8\text{-}6)$$

سنذكر في الفقرة (12 ـ 1) الكثير عن العلاقة بين عروض النطاق المقاسة في الأوساط الكهربائية والبصرية . لقد تم تحقيق عروض نطاق تزيد عن 300 MHz بواسطة الباعثات السطحية إلا ان الـ LED التجارية المتوفرة هي غالباً ذات عروض نطاق أصغر . تتراوح القيم النموذجية لعروض النطاق من 1 MHz إلى 100 MHz .



شكل (6 ـ 8) ـ تغير القدرة البصرية المتناوبة تبعاً لتردد التعديل ω .

يُعرَّف زمن الصعود t_r لمنبع انه الزمن الذي يستغرفه الخرج لكي يتغير من 10٪ إلى 90٪ من قيمته النهائية عندما يكون الدخل قفزة تيار وهذا ما يوضحه الشكل (6 ـ 9) . يؤدي تيار الدخل إلى صعود القدرة من صفر إلى قيمتها النهائية المستقرة . إن الخرج الذي يظهر في الشكل (6 ـ 9) هو شكل موجة التيار المولدة بواسطة المكشاف المستعمل لقياس هذه القدرة .



شكل (6 ـ 9) ـ زمن الصعود لمبع بصري .

يرتبط زمن الصعود مع عرض النطاق الكهربائي 3 dB بالعلاقة التالية :

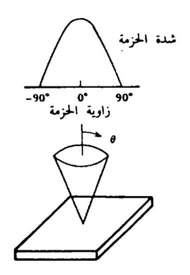
$$f_{3\text{-dB}} = \frac{0.35}{t_r} \qquad (9\text{-}6)$$

تتراوح أزمان الصعود لـ LED نموذجية من بضعة نانوثانية وحتى 250 نانوثانية .

كما نعلم يؤثر الطيف البصري للمنبع مباشرة على تشتيت المادة وتشتيت دليل الموجة . ويتزايد انبساط النبضة العائد لهذين السببين خطياً مع عرض طيف المنبع . تملك أجهزة الـ LED التي تعمل في المدى من 0.8 µm إلى 0.9 µm على العموم عروضاً بين 20 nm و 50 nm وكذلك تملك أجهزة الـ LED التي تبث في مناطق الموجات الأطول عروضاً من 50 nm إلى 100 nm . إن العرض الطيفي المتزايد لباعث ذي طول موجة أطول يُعوَّض بواسطة تشتيت المادة (M) المتناقص بشكل واضح في هذه المنطقة والمبين في الشكل (3 ـ 8) .

تعتمد كفاءة الاقتران بشكل قوي على نمط الاشعاع لباعث ما . تشع الباعثات السطحية بموجب ما يسمى نمط لامبرتياني . في هذا النمط (المبين في الشكل 6 ـ 10) تتناقص القدرة كتابع لـ cos Θ حيث Θ هي الزاوية بين اتجاه

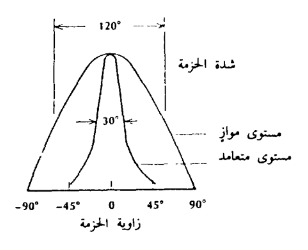
الرؤية والعمود على السطح . يكون السطح الباعث مضيئاً بشكل منتظم إلا ان سطح الاسقاط يتناقص كتابع لـ $\cos \Theta$ عندما تتغير زاوية الرؤية فينتج توزع القدرة اللامبرتيانية . تنقص القدرة إلى 50٪ من قيمة ذروتها من أجل $\Theta=60°$ يبلغ حينئذٍ عرض النطاق عند منتصف القدرة 120° من أجلِ باعث لامبرتياني . ان الأشعة الواردة إلى ليف من خارج زاوية قبوله سوف لن تقرن معه وحيث ان

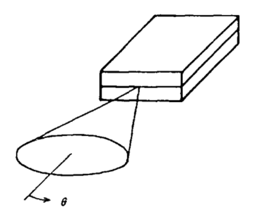


شكل (6 ـ 10) ـ الاشعاع اللامبرتياني من LED باعث سطحي . يبلغ عرض منتصف القدرة 120° .

زاوية القبول لليف ذي NA=0.24 تبلغ فقط حوالي 14° (زاوية مخروط كلية 28°) فسوف ترفض كمية كبيرة من القدرة المولَّدة بواسطة باعث سطحي .

أما الباعثات الحافية فانها تركز إشعاعها إلى حد ما أكثر من الأجهزة السطحية فتقدم كفاءة اقتران أفضل ويبين الشكل (6 ـ 11) نمطاً تمثيلياً لهذه الحالة . تكون الحزمة لامبرتيانية في المستوى الموازي إلى الوصلة إلا انها تتباعد بشكل أبطأ في المستوى المتعامد مع الوصلة . في هذا السطح تحد الأنماط في دليل الموجة الطبقي (المشكلة من تغيرات دليل الانكسار في الاتجاه العمودي) تباعد الحزمة وفي المستوى الموازي لا يوجد تقييد حزمة ويكون الاشعاع لامبرتيانياً . ولزيادة قدرة الخرج المفيدة حتى القيمة العظمى يمكن ان نضع عاكساً عند نهاية





شكل (6 ـ 11) ـ إشعاع غير متناظر من LED باعث حافي .

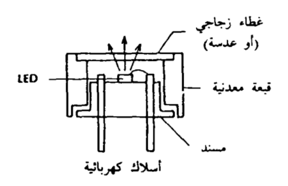
الثنائي المواجه للحافة الباعثة . ويحدث أيضاً تزايد في الخرج إذا غلفت الحافة الباعثة بمضاد الانعكاس لانقاص الانعكاسات عند الحد الفاصل بين نصف الناقل والهواء .

ان الثنائيات الباعثة للضوء مناسبة جداً وتدوم طويلاً إذا عملت ضمن الحدود الموصوفة من درجة الحرارة والجهد والتيار والقدرة المحددة من قبل الجهة المصنِّعة . تتناقص قدرة خرج الـ LED بمرور الزمن . وان عمر الـ LED هو الزمن اللازم حتى تنقص القدرة لنصف قيمتها الأولية . تعتبر مدد حياة من فئة

10^5 ساعة (11 سنة) أو أكثر مألوفة من أجل LEDs جيدة ويمكن ان يسمح بدرجات حرارة بين −30°C و 85°C خلال العمل لبعض الثنائيات مع انه تتناقص قدرة الخرج بارتفاع درجة حرارة الوصلة . يحدد التغير بأقل قليلاً من 1٪ لكل درجة حرارة واحدة وهذا ينتج مثلاً انخفاضاً في القدرة بعامل مقداره 2 إذا ارتفعت درجة الحرارة من 20°C إلى 70°C . ويمكن ارجاع قدرة الخرج إلى القيمة التي كانت عليها قبل ارتفاع درجة الحرارة وذلك بزيادة قيمة التيار القائد .

توجد الباعثات الضوئية بعدة تشكيلات مختلفة ويعود الأمر في بعض الحالات إلى المستثمر الذي يستعمل المهارة والإبداع من أجل تحقيق اقتران فعال بين المنبع وخط النقل الليفي وفي حالات أخرى يشكل المنبع بطريقة تجعل الاقتران سهلاً . سنطلع الآن على بعض من إمكانيات التشكيل .

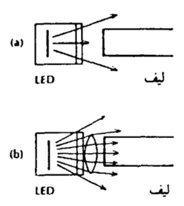
يمكن تركيب الثنائي الباعث للضوء LED على هيكل معياري مثل TO-18 كالمرسوم في الشكل (6 ـ 12) . يغطى الهيكل بقبعة معدنية ذات قمة من



شكل (6 ـ 12) ـ LED مركّب على هيكل .

الزجاج الصافي يمكن أن يمر الضوء من خلالها . وكما يوضحه الشكل (a-13-6) يمكن أن تتوسع الحزمة بسرعة . نلاحظ انه بالإضافة إلى الخسارة في الأشعة خارج حدود زاوية القبول تضيع بعض الأشعة عن الليف كلياً . يمكن إضافة

عدسة خارجية إلى النظام من أجل إنقاص زوايا الشعاع إلا أن العدسة سوف لن تنقص من قطر الحزمة . يبين الشكل (b-13-6) انه لا يزال يضيع بعض من



شكل (6 ـ 13) ـ اقتران منبع مع ليف . LED مغطى بالزجاج . (a) من غير عدسة و (b) بعدسة .

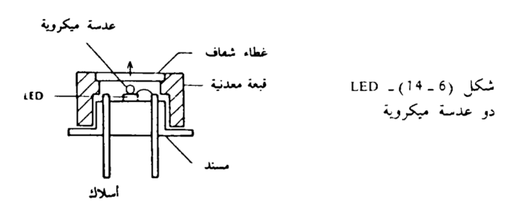
الضوء ونلاحظ من الشكل (6 ـ 12) انه تتحسن الكفاءة إذا ما رفع الغطاء الزجاجي . في بعض التصاميم تكون القبعة المعدنية قابلة للإزالة ويقرن الليف مباشرة إلى الثنائي الباعث أو يكون تماماً فوقه . وسيجري اعتراض معظم الضوء الآن بواسطة نواة الليف . ان اقتران الليف بهذه الطريقة هو عمل شاق يرغب معظم المستثمرين تجنبه .

ينتج المصنّعون أيضاً ثنائيات تستبدل فيها لوحة الغطاء الزجاجي في الشكل (6 ـ 12) بعدسة . تكون هذه العدسة بعيدة عن الـ LED لذلك يكون قطر الحزمة المغادرة للجهاز لا يزال أكبر بكثير من حجم الليف . ان هذا التركيب يناسب ليفاً ضخماً بقطر يبلغ 1000 μm مثلاً .

يمكن شراء ثنائيات يتصل بها جهاز قصير من الليف وتكون هذه البنية بشكل ذيل ينفذ إلى قرب الباعث ويمكن عندها أن يوصل هذا الذيل بوصلة دائمة إلى ليف الإرسال المرغوب . ويمكن كذلك ربط موصل إلى الذيل فيسمح هذا بإجراء توصيل سريع إلى باقي أجزاء النظام . تظهر مشكلة عندما لا يتماثل الذيل مع ليف الإرسال فإذا اختلف قطرا نواتيهما أو فتحتا نفوذيهما ستحدث

خسارة في القدرة عند توصيلها . ستحدد خسارات هذا النوع في الفصل الثامن .

يبين الشكل (6 ـ 14) بنية أخرى حيث توضع عدسة صغيرة جداً (عدسة ميكروية) مباشرة على الباعث . يختلف هذا عن التصميم الذي توضع فيه العدسة بعيداً عن الـ LED لانه في هذه الحالة لا تتوسع الحزمة كثيراً قبل توازيها . ان هذه البنية فعالة من أجل أقطار نواة ليف صغيرة حتى 50 μm وفتحات نفوذ أكبر من 0.1 .



شكل (6 ـ 14) ـ LED ذو عدسة ميكروية

(6 ـ 3) ـ مبادىء الليزر Laser Principles

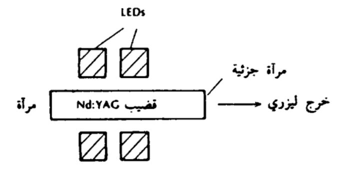
لا يتطلب الأمر ان نكون خبراء بالليزرات كي نستعملها في أنظمة الاتصالات إنما تساعد المعرفة بمبادىء الليزر في توضيح خصوصياته وحدوده . فكلما ازدادت معلوماتنا عن جهاز ما كلما قل احتمال خطئنا باستعماله . مع ان ثنائي الليزر نصف الناقل هو الليزر الأكثر ملاءمة من أجل الاتصالات الليفية فانه يجب ان نتحدث عن ليزرين آخرين : الليزر الغازي الذي يعمل في الطيف المرئي وليزر Nd : YAG أي ليزر

(Neodymium - Yttrium - Aluminum - Garnet)

الذي يبث عند 1.06 μm . ان الليزر الغازي وهو مبدئياً ليزر هليوم ـ نيون والذي يبث عند اللون الأحمر يستعمل من أجل اختبار الألياف والأجهزة البصرية الليفية الأخرى . في اختبار بسيط تقرن حزمة ليزر He Ne إلى ليف عارٍ

من أجل كشف أي قطع أو تشقق في الليف فإذا لم ينفذ أي ضوء من الليف فانه يوجد قطع بالتأكيد . يمكن بالنظر تحديد أي شوائب صغيرة مثل فقاعات الهواء أو تشققات بسيطة وذلك بواسطة انتثار الضوء حولها . يمكن أيضاً كمثال آخر قياس فتحة نفوذ الليف بطريقة مناسبة باستعمال ليزر He Ne وذلك لان فتحة نفوذه (NA) لا تعتمد على طول الموجة .

ان ليزر Nd : YAG هو جهاز بالحالة الصلبة وان موجته ذات الطول 1.06 μm تقع في منطقة ذات تخامد ليف أقل وتشتيت مادة أقل مما للمنطقة ذات المدى من 0.8 μm إلى 0.9 μm المستعملة بشكل شائع بالإضافة إلى ان عرض طيفه يقع حول 0.1 nm وهو أضيق بكثير من عرض الخط لثنائي ليزر LD . وهذا يعني بأن ليزر Nd : YAG سيزيد بشكل كبير عرض النطاق لنظام كان قد تحدد بتشتيت المادة وتشتيت دليل الموجة وليس بالتشوه الشكلي . يصبح هذا الاستنتاج واضحاً عندما ننظر إلى الشكل (6 ـ 20) من أجل ليف وحيد الأسلوب عند 1.06 μm . ان عرض الخط 0.1 nm ينتج انبساط نبضة صغير للغاية لدرجة أنه لا يكاد يظهر على المخطط . يبين الشكل (6 ـ 15) بنية ممكنة لليزر Nd : YAG . ان الوسط الفعال هو قضيب صغير من Nd : YAG محاط بعناصر LED التي تقدم قدرة الدخل . تبعث ثنائيات الـ LED اشعاعاً غير متماسك بأطوال موجة أقصر مما للخرج 1.06 μm المتماسك . هناك سببان لا يشجعان على استعمال ليزر Nd : YAG في النظم الليفية وهما : أولاً إن تعقيد وكلفة الجهاز أكثر بعدة مرات مما لثنائي LED وثانياً يجري التعديل عادة خارجياً



شكل (6 ـ 15) ـ ليزر Nd : YAG .

بعد ان يكون قد تم توليد الضوء . يوجد معدِّلات خارجية مبنية على الآثار الكهربصرية والكهرصوتية الا انها مكلفة وتزيد من متطلبات القدرة للمرسل . وانه لأبسط بكثير أن نعدّل داخلياً الثنائيات الباعثة للضوء والثنائيات الليزرية.

نعرض فيما يلي بعض المميزات التي تملكها جميع الليزرات والمهمة في استخداماتها :

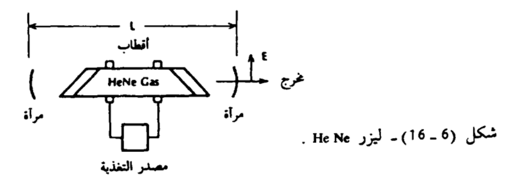
1 ـ عتبة الضخ Pumping threshold : يجب ان تتجاوز قدرة دخل الليزر سوية عتبة معينة حتى يبدأ الجهاز بالإرسال . ان هذا لا يشبه جهاز الـ LED الذي يشع حتى عند سويات منخفضة جداً من تيار الدخل .

2 ـ طيف الخرج Output spectrum : ان قدرة خرج الليزر ليست عند تردد وحيد لكنها تنتشر على مدى من الترددات . ولا تتغير القدرة عادة بشكل منتظم فوق هذا المدى بل تظهر على شكل سلسلة من الذروات والمنخفضات .

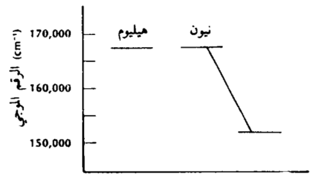
3 ـ نمط الاشعاع Radiation pattern : يعتمد مدى الزوايا الذي يبث الليزر الضوء ضمنه على حجم منطقة الإرسال وعلى أساليب التذبذب داخل الليزر .

من الأسهل توضيح هذه الظواهر من أجل ليزر غازي مما هو من أجل ثنائي ليزر ولهذا السبب سنقوم في بقية هذه الفقرة بتحليل ليزر He Ne . وسنقوم حينئذٍ بتطبيق هذه النتائج على ثنائي الليزر بواسطة التشابه بينهما .

يبين الشكل (6 ـ 16) ليزر He Ne ويبين الشكل (6 ـ 17) مخطط سوية طاقة جزئي لمزيج هليوم ـ نيون . يوجد المزيد من السويات الا أن تلك المبينة



شكل (6 ـ 16) ـ ليزر He Ne .



شكل (6 ـ 17) ـ حالات الطاقة المسموحة لهليوم ـ نيون .

توضح مبادىء فعل الليزر . تمثل السويات حالات الطاقة المسموح بها للالكترونات في الذرة وبأبسط التعابير نقول ان كل حالة تطابق مداراً مختلفاً وقوى دافعة زاوية ومغزلية مختلفة للالكترون .

ان الطاقات المسموحة للذرات في غاز ما تكون خطوطاً مميزة . تملك المواد الصلبة نطاقات طاقات مسموح بها (كتلك المبينة سابقاً في الشكل 6 ـ 1 لأنصاف النواقل) . من المتفق عليه إعطاء سويات الطاقة بوحدات هي معكوس طول الموجة ($1/\lambda$) وهي العدد الموجي للفوتون . يمكن أن نحوِّل العدد الموجي إلى الطاقة المطابقة مقدرة بالجول باستخدام العلاقة $W=hc/\lambda$ التي وردت في الفصل الأول أي اننا ببساطة نضرب العدد الموجي بالمقدار hc .

تكون الذرات عادة في سوية طاقتها الدنيا أي الحالة الأرضية . في هذه الحالة تكون طاقة الذرات صفراً . يمكن لذرة ما ان تمتص الطاقة فترفعها إلى السوية الأعلى فتصبح الذرة حينئذٍ في الحالة المتهيجة . يمكن لذرة ان تصبح متهيجة بامتصاصها فوتوناً وارداً . بهذه الطريقة ترتفع الذرات في الليزر Nd : YAG في الشكل (6 ـ 15) إلى سويات طاقة عالية . في حالة ليزر He Ne يسبب منبع القدرة تدفق تيار تفريغ كهربائي في الغاز . وتتأين ذرات الغاز فتتحرر الكهارب وتتحرك في الأنبوب وتكتسب الالكترونات الحرة طاقة حركية أثناء تسارعها نحو القطب الموجب وبتصادمها بذرات الهيليوم تتخلى هذه الالكترونات عن طاقتها فترفع سويات الطاقة لهذه الذرات . تنتقل هذه الطاقة إلى ذرات النيون عندما تصطدم ذرات الهيليوم المتهيجة بذرات النيون ذات الحالة الأرضَية .

يبين الشكل (6 ـ 17) اثنتين من السويات المتهيجة للنيون . يبلغ فرق الطاقة لهما $15800\ cm^{-1}$ وهذا يطابق طول موجة مقداره :

$$\lambda = 1/15800 = 6.33 \times 10^{-5}\ cm = 0.633\ \mu m$$

دعنا نعتبر الامكانيات المختلفة للتفاعل بين الفوتونات وبين الأعلى والأدنى من هاتين الحالتين المتهيجتين .

1 ـ يمكن لفوتون وارد ذي طول موجة $0.633\ \mu m$ أن يُمتَص بواسطة ذرة موجودة في الحالة المتهيجة الأدنى . ان الفوتون يختفي وتستخدم طاقته لترفع ذرة النيون إلى السوية الأعلى .

2 ـ يمكن لذرة في السوية الأعلى ان تهبط تلقائياً إلى السوية الأدنى . تأخذ الطاقة الفائضة شكل فوتون صادر ذي طول موجة $0.633\ \mu m$. ان هذا يماثل عملية اتحاد ثقب مع الكترون (الإرسال الحاصل لفوتون) في الـ LED . وتشع المظاهر المضيئة الثابتة بواسطة الانبعاث التلقائي .

3 ـ ان ذرة في السوية الأعلى يمكن ان تهبط إلى السوية الأدنى فتصدر فوتوناً ذا طول موجة $0.633\ \mu m$ عندما تتحرض من أجل هذا الفعل بواسطة فوتون وارد ذي طول موجة يبلغ أيضاً $0.633\ \mu m$. ان هذا مثال عن الاصدار المثار . سيُصدَر الفوتون المثار بنفس طور الفوتون المثير الذي يتابع انتشاره .

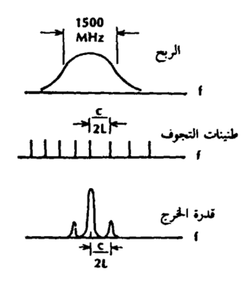
إذا كان يوجد ذرات نيون في السوية المهيِّجة الأدنى أكثر مما هو عليه في السوية الأعلى فان عدد الفوتونات الذي يدخل الغاز سيتناقص بسبب الامتصاص . ومن جهة أخرى إذا كان عدد الذرات في السوية الأعلى يتجاوز عددها الموجود في السوية الأدنى وهو الشرط المدعو «الانعكاس السكاني» فان الفوتونات ستتزايد اثناء انتشارها خلال الغاز . وستصادف فوتونات ذرات السوية الأعلى (مسببة تولد فوتونات إضافية) أكثر مما ستقابل من ذرات السوية الأدنى (التي ستمتصها) . نستنتج ان وسطاً ذا انعكاس سكاني يتمتع بربح ويتصرف كمكبر .

ان الليزر هو مولد تردد عالي أو مذبذب . وحتى تحدث الذبذبة يحتاج النظام إلى تكبير وتغذية راجعة وتوليف لتحديد التردد . من أجل مذبذبات التردد الراديوي يقدم المكبر الالكتروني ربح الإشارة ويقدم المرشاح التردد وتنتج

التغذية الراجعة بربط خرج المكبر إلى مدخله . وفي حال الليزر يقدم الوسط التكبير ويحدد الوسط أيضاً التردد . وهو يفعل هذا من خلال سويات طاقته المميزة والانتقال بين السويات . تحقق المرايا التغذية الراجعة فترتد الفوتونات من المرايا وتعود خلال الوسط من أجل مزيد من التكبير . إن إحدى (أو كلتا) المرآتين تكون مرسلة جزئياً فتسمح لجزء من الضوء المتولد بالظهور .

ان الذبذبة لن تتحقق إلى ان يصبح الربح كافياً ليتغلب على الخسارة . عند تطبيق جهود منخفضة على الليزر يكون الربح أقل من الخسارة فيكون خرج الليزر صفراً . يمكن ان يحدث انبعاث تلقائي إلا ان القدرة ستكون صغيرة ولن يكون الخرج متماسكاً بمعنى ان العرض الطيفي سيكون كبيراً . عندما يتزايد الجهد ترتفع ذرات نيون أكثر إلى السوية الأعلى فيرتفع الربح وعند سوية جهد محددة يساوي ربح النظام عندها الخسارة فتبدأ الذبذبة . يكون الليزر عند عتبة الذبذبة في هذه المرحلة . وستؤدي زيادات إضافية في الجهد إلى قدرة خرج أعلى . ان الضوء المنبعث سيكون الآن متماسكاً (سيكون العرض الطيفي أضيق) . ان مفهوم عتبة الدخل مهم عندما يجري تعديل الليزر داخلياً وخصوصاً ثنائي الليزر .

يُنتج ليزر He Ne ضوءاً أحمراً عند 0.633 μm وهذا يطابق الانتقال بين سويتي النيون الظاهرتين في الشكل (6 ـ 17) . يكون عرض الطيف صغيراً بحدود 1.98×10^{-3} nm ويمثل هذا نطاقاً من الترددات بعرض 1500 MHz . مع أن الانتقال يكون بين سويتي طاقة مميزتين فان عرض الخط ليس صفراً بسبب الحركة الحرارية لذرات النيون في الغاز . تعمل كل ذرة كمنبع دقيق يولد ضوءاً عندما تهبط من حالة طاقة أعلى إلى حالة طاقة أدنى. يتنبأ تأثير دوبلر المعروف جيداً بتغير التردد لمنبع متحرك . فالسرعات العشوائية للذرات تنتج مجالاً من ترددات مزاحة بتأثير دوبلر تحيط بالتردد الذي يحدده الانتقال . نقول بطريقة مختلفة قليلاً أن الوسط يتمتع بتكبير ليس عند تردد وحيد إنما عند نطاق من الترددات . حيث أنه يوجد ذرات تتحرك عند السرعات العالية أقل مما هي عند السرعات الأخفض فان ربح المكبر ينقص بسرعة عند الابتعاد عن التردد المركزي كما يبدو في أعلى الشكل (6 ـ 18) .



شكل (6 ـ 18) ـ خرج ليزر He Ne .

لقد ناقشنا في الفقرة (3 ـ 4) حالات الطنين أو الأساليب الطولية للتجويف المشكل بواسطة مرآتين طرفيتين . تظهر حالات الطنين هذه في الشكل (6 ـ 18) تحت منحنى الربح . من أجل أن يظهر خرج ما عند أي تردد يجب ان يتوفر ربح كاف عند ذلك التردد ويجب ان يكون التجويف طناناً عند ذلك التردد أيضاً . يبدو على الشكل (6 ـ 18) ان هذين الشرطين محققان عند ثلاثة ترددات فقط وهذا ما يفسر وجود ثلاثة أساليب طولية في طيف الخرج . ان التجويف الأطول سينقص الفاصل بين الأساليب مما يسمح بعدد أكثر منها ضمن منحنى الربح ذي العرض 1500 MHz وسيحتوي طيف الخرج حينئذٍ أكثر من ثلاثة أساليب طولية .

تكون عادة شدة الخرج لليزر غازي غوسيّةً حيث نوقش ذلك في الفقرة (2 ـ 5) وكما ظهر في الشكل (2 ـ 26) وتعطى زاوية التباعد لحزمة غوسيّة بالمعادلة (2 ـ 17) .

مثال :

احسب زاوية التباعد لحزمة He Ne غوسيّة ذات حجم بقعة يساوي $25\ \mu m$.

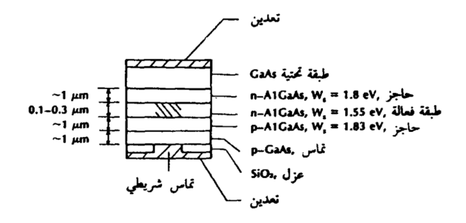
الحل :

من المعادلة (2 ـ 17) نكتب : راديان $\Theta=2(0.0633)/25\pi=0.016$ أو 0.92° . وهذا أصغر بكثير من زاوية القبول لألياف نموذجية وهذا يعني انه يمكن ان تلتقط جميع أشعة الضوء المرسلة . ان خسارة الاقتران الوحيدة ستكون تلك التي تسببها الانعكاسات عند السطح المشترك بين الهواء والليف .

يمكن ان تشع الليزرات انماطاً غير غوسيّة . ان الأنماط المختلفة تتوافق مع الأساليب الكهرمغناطيسية لتجويف ليزري. وتدعى هذه بالأساليب العرضية وتماثل الأساليب في أدلّة الموجة الطبقية العازلة وفي الألياف التي درسناها سابقاً . ان النمط الغوسي هو الأسلوب ذو المرتبة الأدنى . عندما يسمح بأساليب ذات مرتبة أعلى ينتج الليزر نمطاً متعدد الأساليب وهو مجموعة من أنماط الأسلوب المفرد . ان الحزمة متعددة الأساليب أكبر من الحزمة الغوسيّة وتتباعد بسرعة أكبر .

(6 ـ 4) ـ ثنائيات الليزر Laser Diodes (LD)

تتمتع ثنائيات الليزر والثنائيات الباعثة للضوء بتركيب متشابه . يبين الشكل (6 ـ 19) بنية ثنائي ليزر Al Ga As ويمكن مقارنته بالـ LED المبين في الشكل (6 ـ 3) . تكون ثنائيات الليزر دائماً ذات باعثات حافية أي أنها ليست

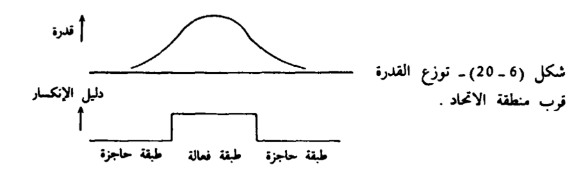


شكل (6 ـ 19) ـ ثنائي ليزر Al Ga As ذو التماس الشريطي .

مثل ثنائيات الـ LED وعندما تستقطب في الاتجاه الأمامي تحقن الشحنات في الطبقة الفعالة حيث تحدث حالة الاتحاد فتسبب الانبعاث التلقائي للفوتونات . تثار بعض الشحنات المحقونة لتنبعث بواسطة فوتونات أخرى وإذا كانت كثافة التيار كبيرة بما فيه الكفاية سيتوفر عدد كبير من الشحنات المحقونة من أجل الاتحاد المثار وسيكون الربح البصري كبيراً . يتم الوصول إلى تيار العتبة عندما يكون الربح كبيراً بما فيه الكفاية لكي يعوض خسارات الثنائي وعند هذه النقطة يحدث تذبذب الليزر . يجب ان يكون تيار العتبة صغيراً لكي لا يحدث زيادة تسخين نصف الناقل وخصوصاً عندما يكون التشغيل متواصلاً أو عند قدرة ذروة كبيرة . يمكن تحقيق عتبة منخفضة بواسطة حصر الشحنات المحقونة والموجة الضوئية في المنطقة الفعالة بواسطة الوصلات غير المتجانسة كما شرح في الفقرة (6 ـ 1) . تقوم الوصلات غير المتجانسة بالحصر في الاتجاه الشاقولي في الشكل (6 ـ 19) . ويؤمّن حصر الشحنات في الاتجاه الجانبي بواسطة التماس الشريطي . تحقن الشحنات ضمن عرض صغير من الشريط (حوالي 10 μm إلى 20 μm) . وتنتشر فقط بشكل خفيف أثناء تحركها إلى طبقة الاتحاد .

يبلغ طول موجة الخرج ، الذي تحدده طاقة ثغرة نطاق مقدارها 1.55 eV في المنطقة الفعالة ، 0.8 μm لثنائي LD في الشكل (6 ـ 19) .

لا يتم حصر الموجة الضوئية كلياً في الطبقة الفعالة لأن ، كما نعلم من دراستنا لدليل الموجة الطبقي ، ذيلا سريع الزوال يمتد خلف الحدود العاكسة كلياً . يوضح الشكل (6 ـ 20) هذه الحال لثنائي ليزري .



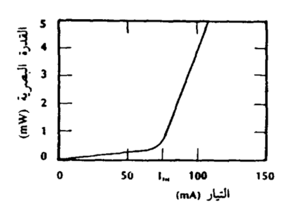
شكل (6 ـ 20) ـ توزع القدرة قرب منطقة الاتحاد .

يتشكل التجويف الليزري بواسطة شق الوجهين الأمامي والخلفي لمادة نصف الناقل في موازاة مستويات بلّورية متوازية . ان الانعكاسية عند سطح الفصل (هواء - Al Ga As) كما حسبت من المعادلة (6 ـ 28) تبلغ 32٪ وذلك باستعمال دليل انكسار مقداره 3.6 لمادة نصف الناقل ويعطي هذا المقدار من الانعكاس تغذية راجعة كافية من أجل التذبذب . وبحسب الرغبة يمكن ان تكون الوجوه الخارجية مغلفة بطبقة عازلة من أجل زيادة الانعكاسية وتبلغ أطوال التجويف النموذجية بحدود 300 µm . كما هو الحال بالنسبة لليزر He Ne تنتج حالات طنين التجويف أساليباً طولية في طيف الخرج . لقد نوقشت الأساليب الطولية لتجويف ما في الفقرة (3 ـ 4) وأوضحت في الشكل (3 ـ 18) من أجل ثنائي ليزري نوع Al Ga As . ان الثنائيات التي تشع طيفاً يحتوي أساليب طولية عديدة تملك عادة حقولاً مكونة من أساليب عرضية عديدة . بمعنى أن ليزراً متعدد الأساليب الطولية يمكن ان يكون جهازاً متعدد الأساليب العرضية . تقدم الليزرات وحيدة الأسلوب الطولي عرض خط أضيق وضوءاً أكثر تماسكاً من الليزرات متعددة الأساليب الطولية مما يجعلها أكثر ملاءمة من أجل الأنظمة الطويلة عالية المعدل . تقدم الليزرات وحيدة الأسلوب العرضي اقتراناً أفضل وخصوصاً مع الألياف وحيدة الأسلوب وذلك لان أساليب المنبع والليف تكون تقريباً متماثلة .

(6 ـ 5) ـ خصائص العمل لثنائي الليزر

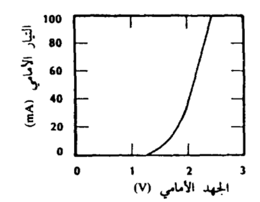
LD Operating Characteristics

يبين الشكل (6 ـ 21) ـ العلاقة بين قدرة الخرج البصرية وتيار الدخل الأمامي لثنائي ليزر نموذجي . يبلغ تيار العتبة 75 mA لهذا الثنائي . ودون هذه السوية يكون التزايد في القدرة البصرية صغيراً بالعلاقة مع التيار القائد وهذا هو الاشعاع غير المتماسك الذي يسببه الانبعاث التلقائي في طبقة الاتحاد . ستبين القياسات الطيفية تناقصاً حاداً في عرض خط الخرج عندما يتجاوز التيار قيمة



شكل (6 ـ 21) ـ العلاقة بين التيار والقدرة لثنائي ليزر .

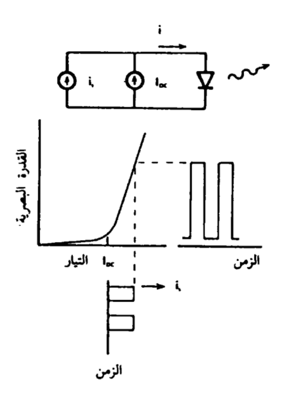
العتبة . تتراوح تيارات العتبة بين 30 mA و 250 mA لمعظم الثنائيات . وعند العتبة تتراوح الجهود بين 1.2 V و 2 V . ويتزايد التيار الأمامي بسرعة مع الجهد كما يبينه الشكل (6 ـ 22) ويبدو ان زيادة صغيرة فقط في الجهد عن قيمة العتبة



شكل (6 ـ 22) ـ مميزات التيار ـ الجهد لثنائي ليزر .

ستقود التيار إلى نقطة عمله . تتراوح قدرات الخرج لليزرات تعمل بشكل متواصل (موجة متواصلة cw) عادة بين 1 mW و 10 mW . يمكن لليزرات نبضية تعمل بدورات تشغيل قليلة ان تنتج بشكل سليم قدرات ذروة أكبر إلا أن الليزرات المتواصلة (cw) التي يمكن أن تتحول بين وصل وقطع (تشغيل متقطع) بمعدلات عالية تكون أكثر فائدة من أجل الاتصالات . ويكون تيار

العمل عموماً أكبر بمقدار من 20 mA إلى 40 mA من تيار العتبة . ان العمل بتيارات أعلى من تلك المقترحة من قبل المصنّع سيقصّر عمر الثنائي .



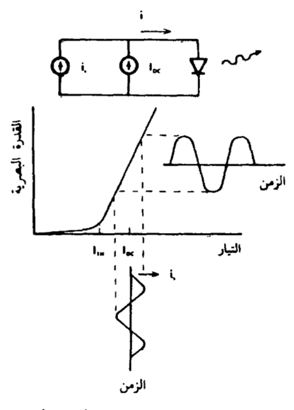
شكل (6 ـ 23) ـ تعديل رقمي لثنائي ليزر .

يختلف التعديل الرقمي لثنائي ليزر المبين في الشكل (6 ـ 23) عن التعديل الرقمي لثنائي باعث للضوء . يضاف تيار انحياز مستمر (I_{DC}) ليكون تيار العمل عند العتبة عندما يكون تيار الإشارة (i_s) صفراً. يتكون رقم ثنائي 1 عندما يحتوي تيار الإشارة نبضة موجبة كما يبينه الشكل . وعندما يُحيّز الثنائي قرب العتبة فانه سيوصل بسرعة أكبر ويمكن ان يكون تيار الإشارة أصغر مما لو لم يكن الثنائي منحازاً .

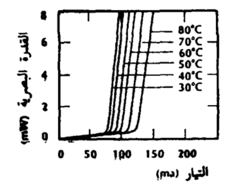
من أجل التعديل التماثلي كما في الشكل (6 ـ 24) يحرك تيار الانحياز المستمر إلى ما وراء العتبة بحيث ان العمل سيكون على الجزء الخطي من منحنى

خواص التيار ـ القدرة . يجب ان نختبر بدقة خطية ثنائي الليزر إذا كان يجب استرجاع الإشارة التماثلية بتشوه توافقي منخفض .

ان ثنائيات الليزر أكثر حساسية لدرجات الحرارة من ثنائيات الـ LED كما يبينه الشكل (6 ـ 25) لحالة ثنائي تمثيلي . عندما ترتفع درجة الحراة يصبح تيار العتبة أكبر (يتزايد بحدود 1.5 ٪ لكل درجة حرارة °C) . وعند تيار ثابت



شكل (6 ـ 24) ـ تعديل تماثلي لثنائي ليزر .



شكل (6 ـ 25) ـ اعتماد ثنائي ليزر على درجة الحرارة .

ستنقص قدرة الخرج بارتفاع درجة الحراة ويمكن ان يكون التغير في القدرة غير مقبول حيث تتزايد اخطاء الكشف في جهاز الاستقبال . اذا هبطت القدرة كثيراً جداً فان الاستقبال يمكن ان يكون مستحيلاً . يوجد تقنيتان للتغلب على هذه المشكلة :

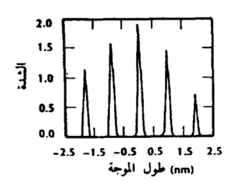
- تبريد الثنائي كهرحرارياً وتغيير تيار الانحياز من أجل تعويض العتبة المتغيرة . ان المبّرد الكهرحراري هو جهاز ذو وصلة نصف ناقلة تتغير درجة حرارتها اعتماداً على اتجاه تدفق التيار . يركب ثنائي الليزر على المبرّد ويشكل مكشاف حرارة من الثيرمستور جزءاً من دارة التحكم التي تغير التيار خلال المبرد الكهرحراري من أجل تثبيت درجة حرارة الثنائي . في النوع الآخر لتثبيت القدرة يقاس التغير الفعلي في الخرج وذلك بواسطة السماح للضوء ان يشع من الطرف الخلف لثنائي الليزر ومن ثم كشف هذه الحزمة بواسطة مكشاف ضوئي . يغيّر حينئذٍ التيار المستمر من أجل ارجاع القدرة البصرية إلى القيمة المرغوبة .

تغطي ثنائيات الليزر Al Ga As المنطقة من 0.8 μm إلى 0.9 μm وتبث الموجة الأطول (في النافذة الثانية) .

ان ثنائيات الليزر أسرع بكثير من ثنائيات الـ LED وان أزمان الصعود لثنائيات ليزر جيدة يتراوح بين 0.1 ns و 1 ns ويمكن ان تعدّل تماثلياً بترددات تصل حتى بضعة آلاف ميغاهرتز . تقاس أزمان الصعود القصيرة لثنائيات منحازة عند العتبة كما يبينه الشكل (6 ـ 23) . يستغرق توصيل الثنائي زمناً أطول إذا ابتدأ من تيار مساوٍ للصفر . وبالمثل يتحدد معدل التعديل التماثلي وهو منحاز عند نقطة ما على الجزء الخطي من منحنى خواص الخرج كما يظهر على الشكل (6 ـ 24) .

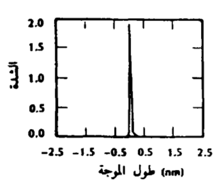
تملك ثنائيات الليزر عادة عروض خط من 1 nm إلى 5 nm وهي أصغر بكثير من طيف الخرج لثنائيات الـ LED . ان عروض الطيف أكبر من تلك الخاصة بالليزرات الغازية وذلك لأن الانتقالات الباعثة في نصف الناقل تكون بين نطاقات الطاقة بينما تقع الانتقالات الغازية بين خطوط مميزة . تنتج هذه

الظاهرة انبساط عرض خط أعرض بكثير من ذلك الذي يسببه أثر دوبلر في الغازات . يبين الشكل (6 ـ 26) طيف ثنائي ليزر نموذجي يعمل بقرب 1.3 μm ونـرى تطابق الذروات المتعددة مع الأساليب الطولية للجهاز .



شكل (6 ـ 26) ـ طيف الخرج لثنائي ليزر متعدد الأساليب .

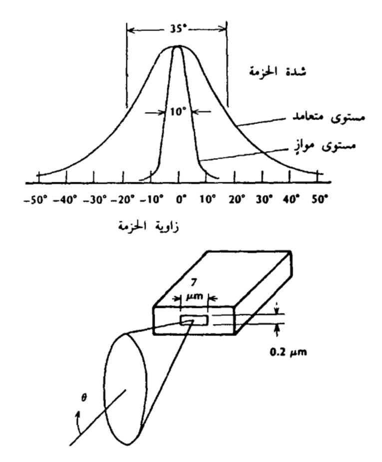
عندما يكون التيار القائد فوق العتبة بقليل تنتج ثنائيات الليزر طيوفاً متعددة الأساليب مثل تلك المبينة في الشكل (6 ـ 26) . عندما يتزايد التيار يتناقص عرض الخط الكلي ويتناقص عدد الأساليب الطولية . وعند تيار كبير بما فيه الكفاية سيحتوي الطيف أسلوباً واحداً فقط . يوضح الشكل (6 ـ 27) طيف ليزر ذا أسلوب وحيد طولي . وكما هو متوقع يكون عرض خطه أصغر بكثير من ذلك الخاص بليزر متعدد الأساليب . ويبلغ عرض الخط بحدود



شكل (6 ـ 27) ـ طيف الخرج لثنائي ليزر ذي أسلوب طولي وحيد .

0.2 nm للطيف المبين في الشكل (6 ـ 27) . ان ثنائياً ذا أسلوب وحيد طولي سينقص حتى الحد الأدنى تشتيت المادة في ليف ما بسبب عرض طيفه الضيق .

ان الثنائيات الليزرية لا تشع بشكل متناظر . وهذا ما يوضحه النمط التمثيلي في الشكل (6 ـ 28) . يجب ان يقارن توزيع الضوء هذا باشعاع LED، ذي سطح باعث في الشكل (6 ـ 10) وبـ LED ذي حافة باعثة في الشكل



شكل (6 ـ 28) ـ نموذج اشعاع لثنائي ليزر .

(6 ـ 11) . ان الضوء من ثنائي ليزر يكون ضمن منطقة زاويّة أصغر بكثير مما يجعل الاقتران مع الليف أسهل وأكثر فعالية . هناك شيء آخر يمكن ان تكون قد لاحظته ويحتاج إلى توضيح وهو أن اتجاه الحزم الضيقة والعريضة بالنسبة إلى الحافة الباعثة قد عكست في الشكلين (6 ـ 11) و (6 ـ 28) . ان الضوء من الـ LED غير متماسك وان البعد الكبير للحافة الباعثة يكون في المستوي الموازي للوصلة وينتج الحزمة العريضة . يقع البعد الضيق للحافة في مستوى متعامد مع

الوصلة ويشع ضمن مدى من الزوايا أصغر ، ويتبع الضوء المتهاسك من الليزر قوانين الانعراج التي عرفناهـا في الفقرة (2 ـ 5) . لقد وجدنا أن تباعد الحزمة كان متناسباً عكسياً مع أبعاد المشع . تنطبق هذه النتيجة فقط على الضوء المتهاسك وهي توضح تباعد الحزمة العريضة المطابقة إلى البعد الضيق للحافة وتباعد الحزمة الأصغر المطابق للبعد العريض للحافة . يملك الثنائي في الشكل (6 ـ 28) عرض حزمة عند نصف القدرة مقداره 10° في المستوى الموازي و 35° في المستوى المتعامد .

لقد تطورت كثيراً وثوقية وعمر الثنائيات الليزرية المتواصلة (cw) منذ بدايات السبعينات عندما ظهرت أجهزة Al Ga As ذات البنية غير المتجانسة الأولى . لقد تجاوزت أعمار الثنائيات التي تعمل عند درجة حرارة الغرفة مدة 11 سنة . وتتدنى الثنائيات بشكل أسرع عند درجات حرارة مرتفعة . وعلى أي حال يمكن توقع أعمار 10000 ساعة حتى عند درجة حرارة 70°C لثنائيات ليزرية تجارية جيدة .

كما هو الحال بالنسبة لثنائيات الـ LED تركّـب ثنائيات الليزر في علب متنوعة . ويجب ان يتم تصميم وتصنيع هذه البنى بعناية وتتضمن متطلبات التعليب ما يلي :

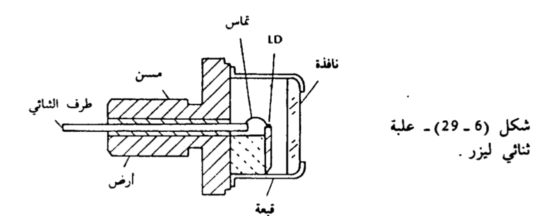
1 ـ إغلاقاً محكماً على الأسلاك ويتضمن هذا الأسلاك الكهربائية والليف (إذا كان يخترق علبة الثنائي) .

2 ـ التوضع الدقيق لرقاقة الليزر ليساعد ذلك على التوافق مع الألياف ذات الاقتران المباشر أو الألياف ذات الاقتران العدسي .

3 ـ بحسب الرغبة ، تجهز العلبة بداخلها بمكشاف ضوئي من أجل مراقبة القدرة المنبعثة من الوجه الخلفي لليزر .

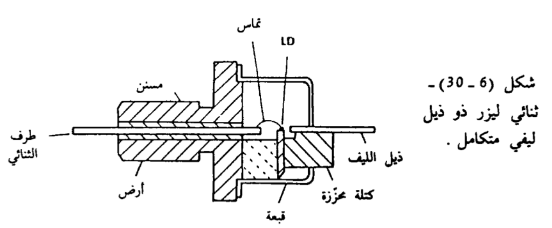
4 ـ من أجل العمل عند درجات حرارة مرتفعة يمكن تركيب الثنائي على مبرّد كهرحراري يوضع داخل العلبة .

تبين الأشكال (6 ـ 29) و(6 ـ 30) و(6 ـ 31) بعضاً من أنواع التعليب الممكنة .



شكل (6 ـ 29) ـ علبة ثنائي ليزر .

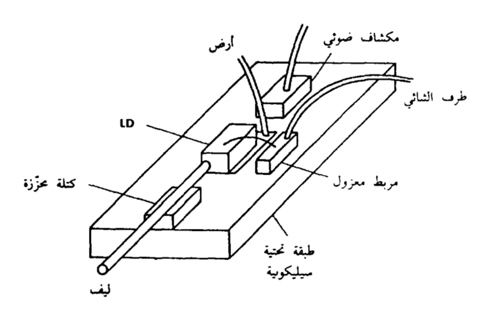
ففي الشكل (6 ـ 29) يستقر الثنائي على ماصّ حراري نحاسي . ويمكن وضع عدسة خارج النافذة من أجل تركيز الضوء على الليف . ويمكن اختيارياً رفع القبعة وتركيب الليف قريباً من حافة الليزر الباعثة . في التعليب المبين في شكل (6 ـ 29) يُحجب الوجه الخلفي الباعث للثنائي مما يجعله غير صالح من أجل غايات المراقبة . تتضمن العلبة المبينة في الشكل (6 ـ 30) ذيلاً ليفياً . يمكن وضع عدسة بين الثنائي والليف من أجل تحسين كفاءة الاقتران ويمكن الحصول على قدرة عظمى من الذيل إذا كان مماثلاً لليف الإرسال . سنقوم في الفصل الثامن بحساب الخسارات الناتجة عن توصيل الألياف غير المتماثلة .



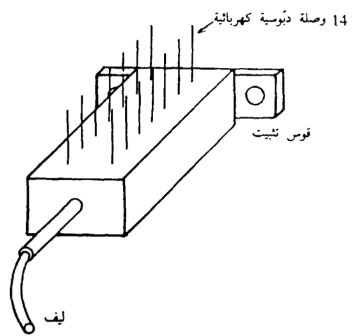
شكل (6 ـ 30) ـ ثنائي ليزر ذو ذيل ليفي متكامل .

يمكن للمستثمر ان يوصل الذيل إلى ليف الإرسال أو يربط موصلاً إلى الذيل من أجل تسهيل وصل و فصل المنبع وحتى انه يمكن لمصنّع الثنائي ان يقدم موصلاً

مربوطاً بحسب قرار المستثمر . ان التنوع الكبير لأحجام الليف وتصاميم الموصل تجعل من المهم بالنسبة للمختصين وصف هذه الأمور بعناية وفهم الخسارات التي ستنتجها .



شكل (6 ـ 31) ـ ثنائي ليزر ذو مراقب قدرة متكامل وذيل ليفي .



شكل (6 ـ 32) ـ علبة ليزر ذات، أربعة عشر دبوساً موزعاً على صفين .

يبين الشكل (6 ـ 31) ثنائي ليزر يتضمن مراقب قدرة . يقيس المكشاف الضوئي القدرة المشعّة من الوجه الخلفي للباعث . يمكن احتواء هذا النوع من الأجهزة في بنية كهربائية نظامية كالعلبة المبينة في الشكل (6 ـ 32) وهي علبة ذات صفين من الدبابيس . تستعمل الدبابس من أجل التوصيل إلى الليزر والمكشاف الضوئي والمبرد الكهرحراري ومراقب درجة الحرارة الثيرمستوري إذا كانت هذه موجودة في العلبة وتوصل هذه المجموعة إلى لوحة دارة تقليدية .

(6 ـ 6) ـ الخلاصة :

من أجل المساعدة في التصميم الأولي يبين الجدول (6 ـ 2) خواص منابع الضوء نصف الناقلة النموذجية . لدينا عند هذه النقطة من المناقشة المعلومات الكافية لكي نختار طول الموجة الحاملة ونوع الليف والمنبع الضوئي . يمكن استعمال الـ LED بشكل مفيد مع ألياف من كلا النوعين SI متعدد الأساليب أو GRIN متعدد الأساليب لكن في مناطق مختلفة من الطيف البصري . في ألياف SI يسيطر التشوه الشكلي ويكون تشتيت المادة الذي يسببه العرض الطيفي العريض للـ LED أصغر ويمكن إهماله غالباً . لذلك سوف لن يفيد إنقاص تشتيت المادة باختيار ثنائي ليزري . لهذه الأسباب تختار عادة ثنائيات الـ LED من أجل وصلات الـ SI متعددة الأساليب . ان الأنظمة التي تستخدم منابع LED وألياف SI متعددة الأساليب ربما ستبقى في النافذة الأولى (من 0.8 μm إلى 0.9 μm) حيث تكون كلفة المكونات قليلة . ان ثنائيات الـ LED التي تشع في النافذة الأولى ليست الأمثل من أجل وصلات GRIN وذلك لأن تشتيت المادة يسبب انبساط نبضة أكثر مما يسببه التشوه الشكلي لليف . تضيع غالباً مزايا ليف GRIN مع هذه المجموعة من المكونات . وعلى أي حال، في النافذة الثانية (بقرب 1.3 μm) يصبح تشتيت المادة عند الحد الأدنى حتى باستعمال منبع LED . يمكن جمع ليف GRIN و LED يعمل في منطقة طول الموجة الطويلة من أجل انتاج نظام يرسل معدلات معطيات عالية ولمسافات طويلة .

نظراً للكلفة الأولية المرتفعة وتعقيد الدارة الكبير تستعمل ثنائيات الليزر فقط عند الضرورة . فمن أجل أنظمة طويلة عالية السعة تعمل هذه الثنائيات بفاعلية مع ألياف GRIN متعددة الأساليب أو الألياف وحيدة الأسلوب . تعمل هذه الأنظمة في النافذة الأولى أو الثانية . في النافذة الثانية تكون خسارات الليف أقل فتسمح بمسارات إرسال أطول .

يتحقق أكبر جداء (معدل ـ طول) عندما تتحقق مواءمة ثنائي ليزر وحيد الأسلوب مع ليف وحيد الأسلوب ويعمل الثنائي في النافذة الثانية ذات الخسارة الضعيفة وطول الموجة الطويل .

جدول (6 ـ 2) ـ مميزات نموذجية لمنابع ثنائيات ضوئية

الخاصة	LED	ثنائي ليزر	ثنائي ليزر وحيد الأسلوب
العرض الطيفي (nm)	20-100	1-5	< 0 2
زمن الصعود (ns)	2-250	0 1-1	0 1-1
عرض نطاق التعديل (MHz)	< 300	< 2000	~ 2000
كفاءة الاقتران (1)	منخفضة جداً	معتدلة	معتدلة
الليف الموافق	(2) SI متعدد الأساليب	GRIN متعدد الأساليب	وحيد الأسلوب
	(3) GRIN متعدد الأساليب	وحيد الأسلوب	
الحساسية لدرجة الحرارة	منخفضة	عالية	عالية
درجة تعقيد الدارة	بسيطة	معقدة	معقدة
العمر (ساعات)	10^5	10^4-10^5	10^4-10^5
النفقات	منخفضة	مرتفعة	الأعلى
الاستعمال الأولي	مسارات معتدلة	مسارات طويلة	مسارات طويلة جداً
	معدلات معطيات معتدلة	معدلات معطيات عالية	معدلات عالية جداً

(1) يمكن تحسين كفاءة الاقتران باستعمال العدسات .

(2) نظام النافذة الأولى .

(3) نظام النافذة الثانية .

مسائل الفصل السادس

6 ـ 1 ـ اعتبر مقاومة على التسلسل مع مكثف . وليكن الدخل إشارة قفزة مقداره 1 V . احسب جهد المكثف الناتج وارسمه بيانياً . واحسب زمن الصعود (10٪ إلى 90٪ من هذا الجهد) بدلالة R و C .

6 ـ 2 ـ في الدارة في المسألة (6 ـ 1) ليكن الدخل : $\upsilon_1 = \cos \omega t$. احسب جهد المكثف وارسمه بيانياً بدلالة ω . بيّن ان عرض النطاق الـ (3-dB) هو : $f_{3\text{-dB}} = 0.35/t_r$ حيث t_r هو زمن الصعود (10٪ إلى 90٪) .

6 ـ 3 ـ يتدفق تيار مكشوف ضوئياً في مقاومة R . ويتناسب هذا التيار مع القدرة البصرية . برهن ان التغير في القدرة البصرية (معبراً عنه بالديسيبل) يساوي نصف التغير في القدرة الكهربائية (معبراً عنه بالديسيبل) .

6 ـ 4 ـ افترض ان القدرة البصرية من LED تتغير مع تردد التعديل وفق المعادلة (6 ـ 7) . بيّن ان عرضي النطاق الكهربائي المكشوف والبصري الـ (3-dB) يرتبطان ببعضهما وفق العلاقة :

$$f_{3\text{-dB}}\ (\text{بصري}) = 1.73\ f_{3\text{-dB}}\ (\text{كهربائي})$$

6 ـ 5 ـ تعطى علاقة القدرة البصرية بالتيار لـ LED بالعلاقة التالية : P=0.02 i . والقدرة العظمى المسموح بها تساوي 10 mW . وان لثنائي الـ LED تيار انحياز مستمر وتيار متناوب بتردد 1 MHz .

أ ـ ارسم منحنى التيار ـ القدرة (خواص النقل للثنائي) .

ب ـ إذا كانت قدرة القمة للإشارة تساوي 10 mW فاحسب تيار القمة الكلي وتيار الانحياز المستمر والقدرة البصرية المتوسطة ودليل التعديل أي :

$$\left(\frac{\text{قدرة القمة للإشارة}}{\text{القدرة المتوسطة}}\right)$$

ت ـ كرّر الجزء . ب ـ إذا كان دليل التعديل 100٪ (وقدرة القمة للإشارة لم تعد 2 mW) .

ث ـ ليكن التيار المستمر 50 mA وتيار الذورة المتناوب 75 mA . ارسم بيانياً قدرة الخرج بدلالة الزمن لدورتين من الإشارة المتناوبة .

6 ـ 6 ـ عندما يطبق جهد مقداره 2 V على طرفي ثنائي LED يمر تيار مقداره 100 mA وينتج قدرة بصرية مقدارها 2 mW . فكم تبلغ كفاءة التحويل للـ LED من القدرة الكهربائية إلى القدرة البصرية ؟

6 ـ 7 ـ ثنائي LED يبلغ عرض نطاقه الـ (3-dB) قيمة 100 MHz (يحدد كلياً بواسطة زمن حياة حامله) . احسب زمن حياة الحامل . ارسم بيانياً التردد المقيَّس للثنائي (كما في الشكل 6 ـ 8) للمدى من صفر إلى 500 MHz .

6 ـ 8 ـ احسب طاقة ثغرة النطاق لـ Ga As بالجول .

المراجع

الفصل السادس

1. H. Kressel. "Electroluminescent Sources for Fiber System. "In *Fundamentals of Optical Fiber Communications*. 2d ed., edited by Michael K. Barnoski. New York: Academic Press, Inc., 1981. pp. 187-255.
2. H. Kressel, M. Ettenberg, J. P. Wittke, and I. Ladany. "Laser Diodes and LEDs for Fiber Optical *Communications.*" In *Semicaonductor Devices for Optical Communication,* Edited by H. Kressel. Berlin: Spring-Verlag, 1980: 9-62.
3. Introductory texts covering lasers include the following:
   Donald C. O'Shea, W. Rusell Callen, and William T. Rhodes. *Introduction to Lasers and their Applications*. Reading Mass.: Addison-Wesley Pulbishing Company, 1977.
   Joseph T. Verdeyen. *Laser Electronics*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc., 1981.
   Amnon Yariv. *Indroduction to Optical Electronics*. 2d ed. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1976.
4. Laser diodes are covered in detail in referenced 1-3.

الفصل السابع

المكاشيف الضوئية

Light Detectors

يمكن كشف الضوء بواسطة العين إلا أن العين ليست مناسبة من أجل الاتصالات الليفية الحديثة وذلك لأن استجابتها بطيئة جداً وحساسيتها للإشارات ذات المستوى المنخفض غير ملائمة أيضاً وليس من السهل توصيلها بالمستقبلات الالكترونية من أجل التكبير وفك الترميز أو من أجل معالجات أخرى للإشارة . وبالإضافة لذلك تكون الاستجابة الطيفية للعين محددة ضمن أطوال موجة تتراوح بين $0.4\ \mu m$ و $0.7\ \mu m$ حيث تكون خسارات الألياف عالية . ومع ذلك تكون العين مفيدة جداً عند اختبار الألياف بالضوء المرئي . حيث يمكن ملاحظة الكسور والانقطاعات بمشاهدة الضوء المتناثر . يمكن رصف الأنظمة والقوارن والموصلات بالنظر بواسطة منبع ضوء مرئي قبل ربط باعث الأشعة تحت الحمراء . يخصص باقي هذا الفصل للبحث في الأجهزة التي تحول الاشعاع البصري مباشرة إلى إشارات كهربائية (إما تيار أو جهد) والتي تستجيب بسرعة للتغيرات في سوية القدرة البصرية .

(7 ـ 1) ـ مبادىء الكشف الضوئي

Principles of Photodetection

سننظر آليتين مميزتين للكشف الضوئي . الأولى وهي الأثر الكهرضوئي الخارجي وفيها يتم تحرير الكترونات من سطح معدن بواسطة الطاقة الممتصة من سيل وارد من الفوتونات . يعتمد على هذه الظاهرة كل من الثنائي الضوئي المفرغ وأنبوب المضاعف الضوئي . أما المجموعة الثانية من المكاشيف هي الأجهزة ذات الوصلة نصف الناقلة حيث تتولد فيها حوامل شحنة حرة (الكترونات وثقوب) بامتصاص الفوتونات الواردة. وتدعى هذه الآلية أحياناً بالأثر الكهروضوئي الداخلي . تستخدم هذه الظاهرة ثلاثة أجهزة شائعة وهي الثنائي الضوئي ذو الوصلة pn والثنائي الضوئي PIN والثنائي الضوئي الجرفي (avalanche) .

إن خواص المكشاف المهمة هي : الاستجابية Responsivity والاستجابة الطيفية spectral response وزمن الصعود rise time . تعرف الاستجابية ρ أنها نسبة تيار خرج المكشاف إلى قدرة دخله البصرية ويعبر عن ذلك بالعلاقة التالية :

$$\rho = \frac{i}{p} \qquad (1\text{-}7)$$

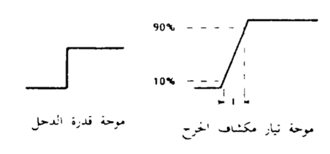
إن وحدات الاستجابية هي أمبير لكل وات . يكون الخرج الكهربائي في بعض أنواع المكاشيف مقدراً بالفولط لذلك تعطى الاستجابية في هذه الحالة بوحدات الفولت لكل واط من القدرة الواردة . تشير الاستجابة الطيفية إلى منحنى استجابية المكشاف كتابع لطول الموجة . وبسبب التغير السريع للاستجابية مع تغير طول الموجة يجب استعمال مكاشيف مختلفة في نافذتي الطيف البصري حيث تكون خسارات الليف صغيرة . وعند تصميم المستقبل يجب استعمال الاستجابية عند طول محدد لموجة صادرة عن المنبع وضمن أي من النافذتين .

إن زمن الصعود t_r هو الزمن الذي يستغرقه تيار المكشاف لكي يتغير من 10٪ إلى 90٪ من قيمته النهائية عندما يكون تغير قدرة الدخل البصرية على شكل درجة (قفزة) وهذا يتفق مع تحديد زمن الصعود لمنبع بصري كما أوضحناه في الفصل 6 . يبين الشكل (7 ـ 1) زمن صعود المكشاف أما عرض نطاق التعديل 3 dB للمكشاف هو كما يلي :

$$f_{3-dB} = \frac{0.35}{t_r} \qquad (2\text{-}7)$$

وعند هذا التردد تبلغ قدرة الإشارة الكهربائية في المستقبل نصف قيمتها الحاصلة عند ترددات تعديل منخفضة جداً وذلك بافتراض أن نفس الكمية من قدرة الإشارة البصرية ترد على المكشاف في كلتا الحالتين .

سنورد خواص المكشاف الضوئي الأخرى في المواقع المناسبة من بقية هذا الفصل .



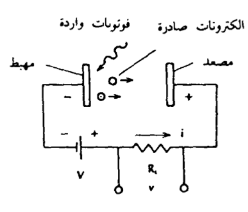
شكل (7 ـ 1) ـ زمن الصعود لمكشاف ضوئي .

(7 ـ 2) ـ المضاعِف الضوئي Photomultiplier

ان الثنائي الضوئي المفرغ والمضاعِف الضوئي لا يحتلان مكاناً في أنظمة الاتصالات الليفية العملياتية مع أنهما يمكن ان يكونا مفيدين في اختبار المركّبات الليفية . ان الحساسية العالية للمضاعِف الضوئي تجعله مفيداً على وجه الخصوص عند قياس سويات ضعيفة من القدرة البصرية . إن مكاشيف الاصدار الضوئي تكون إلى حد ما أسهل للتوضيح من أجهزة أنصاف النواقل .

يملك كل من النوعين عدة صفات مشتركة . ولهذا السبب سنبدأ مناقشتنا لعمل المكشاف الضوئي بالباعثات الضوئية .

يبين الشكل (7 ـ 2) رسماً لثنائي ضوئي مفرغ . يطبق جهد استقطاب فيجعل المصعد موجباً والمهبط سالباً . في حال عدم وجود الضوء يكون التيار في



شكل (7 ـ 2)ـ ثنائي ضوئي مفرغ .

المقاومة صفراً ويكون جهد الخرج صفراً . وعندما يتعرض المهبط للضوء تُمتص الفوتونات الواردة فتتخلى عن طاقتها إلى الكترونات المعدن . تحصل بعض هذه الالكترونات على طاقة كافية لكي تهرب من المهبط . تتحرك هذه الالكترونات الحرة نحو المصعد مجذوبة بشحنته الموجبة . وخلال هذه الحركة تتحرك الشحنة الموجبة خلال الدارة الخارجية (أي خلال مقاومة الحمل) إلى المصعد مجذوبة بالالكترونات المقتربة المشحونة سلبياً وبكلمات أخرى نقول إن تياراً يمر خلال الدارة . وعندما تصدم الالكترونات المصعد تتحد مع الشحنات الموجبة ويتوقف تيار الدارة .

يتطلب تحرير الكترون واحد من المهبط كمية دنيا من الطاقة تدعى تابع العمل . يجب ان يملك الفوتون الوارد على الأقل هذه الطاقة من أجل اصدار الكترون ما . ليكن ϕ تابع العمل ، يكون حينئذٍ شرط تحرير الالكترون كما يلي :

$$h f \geq \phi \qquad (3\text{-}7)$$

يكون أدنى تردد بصري يمكن كشفه هو $f=\phi/h$ وهذا يطابق موجة طولها $\lambda=hc/\phi$. إذا أعطي تابع العمل بالالكترون فولت فان طول موجة القطع مقدراً بالميكرومتر يصبح كما يلي :

$$\lambda = \frac{1.24}{\phi} \qquad (4\text{-}7)$$

ان الموجات التي يزيد طولها عن هذا الحد لا يمكن كشفها بسبب عدم كفاية طاقة الفوتون . أما الفوتونات ذات طول الموجة الأقصر فيمكن كشفها إذ أنها ذات طاقة أكبر .

مثال :

يملك السيزيوم Cesium وهو مادة باعثة للضوء شائعة تابع عمل مقداره 1.9 eV احسب طول موجة القطع له .

الحل :

من المعادلة (7 ـ 4) نكتب : $\lambda=1.24/1.9=0.65\ \mu m$. يمكن بواسطة مهبط سيزيوم ان نكشف فقط أطوال الموجة التي تكون أقصر من هذه القيمة .

يبين هذا المثال أن مكشاف السيزيوم ليس حساساً أبداً لأطوال موجة بقيمة $0.8\ \mu m$ وأكثر حيث تعمل الأنظمة الليفية . يمكن لباعثات الضوء المفرغة غير السيزيوم ان تكشف أطوال موجة تبلغ حتى $1.1\ \mu m$ إلا أن استجابتها ضعيفة فعلاً عند الموجات الأطول . وعلى أي حال ان الثنائي الضوئي المفرغ هو ثنائي كبير الحجم ويتطلب جهداً عالياً جداً (عدة مئات من الفولت أو أكثر) حتى يصبح عملياً من أجل الاتصالات الليفية . سنتابع على كل حال مناقشتنا عن هذا الجهاز بسبب الضوء الذي يلقيه على عمل الأنبوب المضاعف الضوئي والمكاشيف من أنصاف النواقل .

ليس كل فوتون يملك طاقة أكبر من تابع العمل سيحرر الكتروناً . توصف هذه الخاصة بواسطة كفاءة الكَمْ η للباعث وتحدد كما يلي :

$$\eta = \frac{\text{عدد الالكترونات الصادرة}}{\text{عدد الفوتونات الواردة}} \qquad (5 - 7)$$

يمكن بسهولة حساب استجابية المكشاف الضوئي في المعادلة (7 ـ 1) . حيث ان القدرة البصرية هي الطاقة المسلمة إلى المكشاف في كل ثانية و hf هي الطاقة لكل فوتون عندئذٍ يكون P/hf هو عدد الفوتونات التي تصدم المهبط بالثانية وباعتبار ان كفاءة الكم هي η فيكون عدد الالكترونات الصادرة بالثانية هو $\eta P/hf$. وحيث ان كل الكترون يحمل شحنة مقدارها e يكون مقدار الشحنة المنبعثة من المهبط بالثانية (أي التيار) كما يلي :

$$i = \frac{\eta e P}{h f} = \frac{\eta e \lambda P}{h c} \qquad (6\text{-}7)$$

وهذا هو التيار الذي يتدفق خلال المقاومة في الدارة الخارجية . يتصرف المكشاف كما لو كان منبعاً للتيار من أجل الدارة المستقبلة . وتكون الاستجابية كما يلي :

$$\rho = \frac{i}{P} = \frac{\eta e}{h f} = \frac{\eta e \lambda}{h c} \qquad (7\text{-}7)$$

ويكون جهد الخرج كما يلي :

$$v = \frac{\eta e P R_L}{h f} = \rho P R_l \qquad (8\text{-}7)$$

تصلح المعادلات الثلاثة الأخيرة من أجل المكاشيف الباعثة للضوء والمكاشيف ذات الوصلة نصف الناقلة . تبين المعادلة (7 ـ 6) أن التيار المكشوف يتناسب مباشرة مع القدرة البصرية وهذه هي الخاصة التي افترضناها في كتابنا هذا .

مثال :

احسب استجابية مكشاف ذي كفاءة كَمّ مقدارها 1٪ عند 0.8 μm .

الحل :

من المعادلة (7 ـ 7) نكتب :

$$\rho = \frac{(0.01)\ (1.6\times10^{-19})\ (0.8\times10^{-6})}{(0.63\times10^{-34})\ (3\times10^{8})} = 0.0064\ \text{A/W}$$

$$= 6.4\ \text{mA/W}$$

مثال :

استخدم نتائج المثال السابق لحساب الجهد على مقاومة حمل 50 Ω عندما تكون القدرة البصرية الممتصة من قبل المكشاف مساوية إلى 1 μW .

الحل :

سيكون التيار الذي ينتجه المكشاف مساوياً إلى :

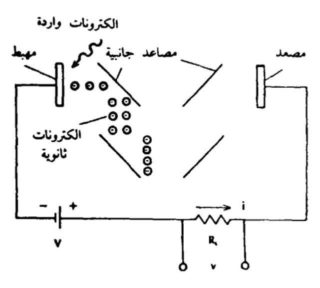
$$i = (6.4\times10^{-3})\ (10^{-6}) = 6.4\ \text{nA}$$

وسيكون جهد الخرج حينئذٍ صغيراً جداً ويساوي :

$$v = (6.4\times10^{-9})\ (50) = 320\ \text{nV}$$

يملك الأنبوب المضاعف الضوئي (PMT) استجابية أكبر بكثير مما للثنائي الضوئي بسبب آلية تكبير داخلي . يبين الشكل (7 ـ 3) رسماً لـ (PMT) . تتسارع فيه الالكترونات الصادرة عن المهبط باتجاه قطب يدعى المصعد الجانبي . يجذب المصعد الجانبي الأول الالكترونات وذلك لانه يكون عند جهد أعلى من جهد المهبط ويكون هذا الجهد عادة بحدود 100 V أو أكثر . تملك الالكترونات التي تصدم المصعد الجانبي طاقات حركية عالية . تتخلى هذه

الالكترونات عن طاقتها فتسبب تحرير الكترونات من المصعد الجانبي . تدعى هذه العملية الاصدار الثانوي ويمكن لالكترون وارد ان يحرر أكثر من الكترون ثانوي وهكذا يكبر التيار المكشوف . يتم تكبير التيار عند كل مصعد من المصاعد



شكل (7 ـ 3) ـ مضاعف ضوئي .

الجانبية المتتالية ويجب ان يكون كل مصعد جانبي عند جهد أعلى من جهد المصعد الجانبي الذي يسبقه وذلك لكي يجذب الالكترونات وبالتالي يسرعها .

يقدر ربح كل مصعد جانبي بعدد الالكترونات الثانوية التي يحررها الكترون وارد . ويتراوح الربح عموماً ما بين 2 و 6 . لنتابع تقدم الكترون وحيد مصدَّر ضوئياً خلال الأنبوب المضاعف . إذا كان الربح عند كل مصعد جانبي يساوي δ يكون عدد الالكترونات المنبعثة من المصعد الجانبي الأول هو δ . ويكون عدد الالكترونات في الأنبوب بعد المصعد الجانبي الثاني هو δ^2 وبعد الثالث يبلغ العدد δ^3 وهكذا . وعندما يوجد N مصعد جانبي يكون الربح الكلي حينئذٍ كما يلي :

$$M = \delta^N \qquad (9\text{-}7)$$

ويكون التيار في الدارة الخارجية حينئذٍ كما يلي :

$$i = \frac{M \eta e P}{h f} \qquad (10\text{-}7)$$

مثال :

احسب تكبير التيار في أنبوب مضاعِف ضوئي إذا كان الربح عند كل مصعد جانبي يساوي 5 وعدد المصاعد الجانبية يساوي تسعة .

الحل :

من المعادلة (7 ـ 9) نكتب : $M = 5^9 = 1.95 \times 10^6$

أي أن ربح التيار يبلغ مليونين تقريباً .

مثال :

يستعمل PMT ذو الربح المحسوب سابقاً من أجل كشف قدرة بصرية مقدارها $1\ \mu W$ عند $0.8\ \mu m$. إذا كانت كفاءة المهبط 1٪ ومقاومة الحمل $50\ \Omega$. احسب كلاً من الاستجابية والتيار وجهد الخرج .

الحل :

ان القيم العددية في هذا المثال ما عدا الربح هي كالتي استخدمناها في الأمثلة السابقة التي تضمنت الثنائي الضوئي المفرغ . تبلغ الاستجابية الآن ما يلي :

$(1.95 \times 10^6)\ (6.4 \times 10^{-3}) = 12.5$ KA/W

ويكون التيار : $(12.5 \times 10^3)\ (10^{-6}) = 12.5$ mA

ويبلغ الجهد : $(12.5 \times 10^{-3}) \times (50) = 0.625$ V = 625 mV

يدل هذا على زيادة مهمة فوق 320 nV التي نتجت بالثنائي الضوئي .

ان التكبير ضمن المكشاف كالذي يحدث في الـ PMT هو تكبير داخلي وهذا يختلف عن التكبير الخارجي الذي نحصل عليه من المكبرات الالكترونية

التي تلي المكشاف . يتمتع التكبير الداخلي بميزة هامة فهو يزيد سوية الإشارة دون تخفيض نسبة قدرة الإشارة إلى قدرة الضجيج بشكل كبير . تضيف المكبرات الخارجية دائماً ضجيجاً إلى النظام فتخفض نسبة الإشارة إلى الضجيج . حيث ان المضاعفات الضوئية ذات تكبير عالٍ فإنها تفيد في كشف السويات المنخفضة من الاشعاع وفي التغلب على الضجيج الصادر عن المنابع الحرارية . سنأخذ بعين الاعتبار آثار الضجيج بتفصيل أكثر في الفصل 11 .

إن المضاعفات الضوئية سريعة جداً حيث يملك بعضها أزمان صعود من فئة بضعة أعشار النانوثانية . أما سيئاتها فهي الكلفة العالية والحجم والوزن الكبيرين وكذلك الحاجة إلى منبع تغذية لكي يقدم مئات الفولتات كجهد استقطاب .

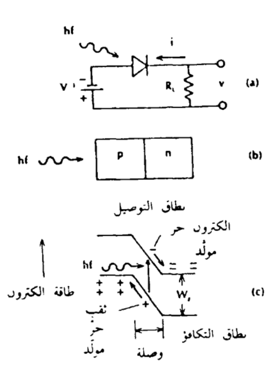
(7 ـ 3) ـ الثنائي الضوئي نصف الناقل

Semiconductor Photodiode

ان الثنائيات ذات الوصلة نصف الناقلة صغيرة الحجم وخفيفة وحساسة وسريعة ويمكن ان تعمل بجهد استقطاب من فئة بضعة فولتات وهي مثالية تقريباً من أجل الأنظمة الليفية . سنبحث ثلاثة أشكال من هذه الأجهزة : نوع pn ونوع PIN والثنائي الضوئي الجرفي .

يبين الشكل (7 ـ 4) ثنائياً ضوئياً pn بسيطاً حيث يبين آلية الكشف الأساسية للمكشاف ذي الوصلة . وعندما يستقطب عكسياً يتزايد حاجز الطاقة الكموني بين المنطقتين p و n . ولا تستطيع الالكتروناتُ الحرة (التي توجد عادة في المنطقة n) أو الثقوبُ الحرة (التي توجد عادة في المنطقة p) اختراق الحاجز وبالتالي لا يتدفق أي تيار . تشير الوصلة إلى المنطقة حيث يوجد الحاجز . وحيث انه لا يوجد شحنات حرة في الوصلة لذلك تدعى هذه المنطقة بالمنطقة الفقيرة depletion region وعلى اعتبار انها لا تملك شحنات حرة تكون مقاومتها عالية وينتج عن ذلك ان يظهر كل هبوط الجهد عبر الثنائي تقريباً على طرفي

الوصلة ذاتها . لذلك تكون القوى الكهربائية كبيرة في المنطقة الفقيرة ومهملة خارجها .



شكل (7 ـ 4) ـ ثنائي ضوئي ذو الوصلة نصف الناقلة . (a) ـ الثنائي المستقطب عكسياً ، (b) ـ الوصلة pn و (c) مخطط سوية الطاقة .

يبين الشكل (c-4-7) فوتوناً وارداً قد امتص في الوصلة بعد عبوره خلال الطبقة p . ترفع الطاقةُ الممتصةُ الكترونًا مقيداً عبر ثغرة النطاق من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل . يبقى ثقب حر في نطاق التكافؤ في الموضع الذي أخلاه الالكترون . وبهذه الطريقة يتم خلق حاملات الشحنة الحرة بواسطة امتصاص الفوتون . سيعبر الالكترونُ الحاجز نزولاً وسيعبر الثقبُ (الذي طاقة كمونه معاكسة لتلك الخاصة بالالكترون) الحاجز صعوداً . وهذه الشحنات المتحركة تسبب تدفق تيار خلال الدارة الخارجية بنفس الطريقة التي تسبب فيها الالكترونات المصدَّرة ضوئياً مرور تيار في ثنائي ضوئي مفرغ . عندما تتحد

الالكترونات والثقوب الحرة أو عندما تصل إلى حافة الوصلة حيث تكون القوى الكهربائية صغيرة تتوقف الشحنات عن الحركة فيتوقف التيار .

ماذا يحدث عندما يُمتص فوتونٌ في المنطقة p أو المنطقة n خارج الوصلة ؟ يظهر زوج (الكترون ـ ثقب) الا أن هذه الشحنات الحرة سوف لن تتحرك بسرعة وذلك بسبب القوى الكهربائية الضعيفة خارج الوصلة . ستنتشر معظم الشحنات الحرة ببطء خلال الثنائي وستتحد قبل الوصول إلى الوصلة . تنتج هذه الشحنات تياراً مهملاً فتنقص بالتالي استجابية المكشاف ومن الواضح أن هذه الظاهرة تجعل مكشاف pn غير فعال . ومن أجل رفع الاستجابة يمكن ان يكامَل مكبر متقدم preamplifier على نفس الرقاقة كالثنائي فيكون الجهاز الناتج هو مكبر متقدم ـ مكشاف متكامل (IDP) .

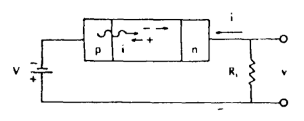
يمكن لحاملات الشحنة التي تتولد بقرب الطبقة الفقيرة ان تتجه نحوها ويمكن بالنتيجة ان تندفع عبر الوصلة بواسطة القوى الكهربائية القوية هناك . ينتج عن ذلك تيار خارجي الا انه يكون متأخراً بالنسبة للتغيرات في القدرة البصرية الواردة . نفترض اننا نرغب في قياس زمن الصعود لثنائي ضوئي pn بتطبيق قدرة دخل بصرية درجية . ان بعض الفوتونات من الجبهة الأمامية للدرجة ستُمتص في الوصلة مسببة تدفق تيار فوري تقريباً . وعلى أي حال فإن تلك الفوتونات من الجبهة الأمامية والتي تُمتص بقرب الوصلة ستسبب تدفق تيار متأخر قليلاً . لذلك سيُظهر اختبارنا تزايداً تدريجياً في التيار وسيتم الوصول إلى القيمة العظمى بعيد ان يكون قد طبق الدخل الدرجي . وسيكون زمن الصعود طويلاً . تملك ثنائيات pn النموذجية أزمان صعود من فئة الميكروثانية مما يجعلها غير مناسبة من أجل الأنظمة الليفية ذات المعدل العالي . تحل بنية ثنائي PIN مشكلة الاستجابية الضعيفة والاستجابة البطيئة وسنناقش هذا الجهاز في الفقرة التالية .

من المثير للاهتمام مقارنة وصلة نصف الناقل المستعملة كباعث ضوئي وكمكشاف ضوئي . فمن أجل الاصدار يستقطب الثنائي أمامياً وتتحد الشحنات المحقونة في الوصلة لكي تنتج فوتونات . أما من أجل الكشف فتعكس العملية . يستقطب الثنائي عكسياً وتولِّد الفوتونات الواردة أزواج

(الكترون ـ ثقب) فتنتج تياراً كهربائياً . يمكن تصميم عنصر pn مفرد لكي يستعمل كباعث وكمكشاف الا ان ذلك الأمر ليس شائعاً .

(7 ـ 4) ـ ثنائي ضوئي نوع PIN

ان الثنائيات الضوئية PIN هي المكاشيف الأكثر شيوعاً في الأنظمة الليفية . يتضمن الثنائي PIN طبقة نصف ناقلة ضمنية عريضة بين المنطقتين p و n كما يوضحه الشكل (7 ـ 5) . لا تحتوي الطبقة الضمنية على شحنات حرّة



شكل (7 ـ 5) ـ ثنائي ضوئي PIN .

وهكذا تكون مقاومتها عالية ويظهر عليها معظم جهد الثنائي فتكون القوى الكهربائية بداخلها قوية . وحيث ان الطبقة الضمنية عريضة جداً لذلك يوجد احتمال قوي لأن تُمتص فيها الفوتونات الواردة وليس في المنطقتين p و n الرقيقتين . ان هذا يحسن الكفاءة والسرعة بالمقارنة مع الثنائي الضوئي pn .

طول موجة القطع Cutoff wavelength

من أجل ان ننتج زوج (الكترون ـ ثقب) يجب على الفوتون الوارد أن يملك طاقة كافية لكي يرفع الكتروناً ما عبر ثغرة النطاق . ان هذا المطلب وهو $hf \geqslant W_g$ يقود إلى طول موجة قطع تساوي :

$$\lambda = \frac{1.24}{W_g} \qquad (11\text{-}7)$$

حيث λ تقدر بالميكرومتر و W_g هي طاقة ثغرة النطاق وتقدر بالالكترون فولت وهذه تشبه تماماً المعادلة (7 ـ 4) للباعثات الضوئية .

مثال :

احسب طول موجة القطع من أجل ثنائيات PIN سيليكون وجرمانيوم . تبلغ طاقتي ثغرة نطاقهما 1.1 eV و 0.67 eV على التوالي .

الحل :

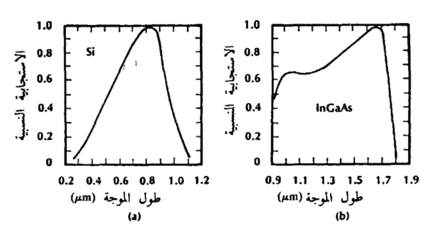
تعطي المعادلة (7 ـ 11) طول موجة القطع وتساوي 1.1 µm للسيليكون و 1.85 µm للجرمانيوم .

المــواد

ان السيليكون هو المكشاف البصري الليفي الأكثر استخداماً في النافذة الأولى إلا أن المثال السابق قد اظهر انه لا يمكن استخدامه في النافذة الثانية ذات الموجة الطويلة حوالي 1.3 µm . تبدي ثنائيات الجرمانيوم والـ In Ga As ضجيجاً أكثر مما يبديه السيليكون إلا انها تستجيب في النافذة الثانية . يلخص الجدول (7 ـ 1) مواد ثنائي PIN الأكثر شيوعاً . وتظهر الاستجابات الطيفية لكل من السيليكون والـ In Ga As على الشكل (7 ـ 6) . ان نقص الاستجابية للموجات الأقصر سببه الزيادة في امتصاص الفوتونات في المنطقتين p و n .

جدول (7 ـ 1) ـ ثنائيات ضوئية PIN نصف ناقلة

المادة	مدى طول الموجة µ m	طول موجة استجابة الذروة µ m	استجابية الذروة A/W
سيليكون	0.3-1.1	0.8	0.5
جرمانيوم	0.5-1.8	1.55	0.7
In Ga As	1.0-1.7	1.7	1.1



شكل (7 ـ 6) ـ منحنيات الاستجابة الطيفية .

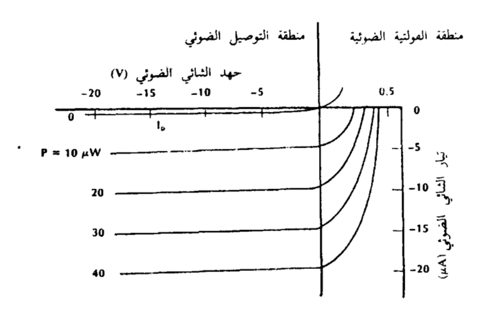
يملك كل من السيليكون و In Ga As كفاءات كَمْ عند الذروة بحدود 0.8 وباستعمال هذه القيمة في المعادلة (7 ـ 7) للسيليكون عند 0.8 μm تنتج استجابية مقدارها 0.5 A/W . لاحظ كم هي أكبر هذه القيمة نسبة للقيمة 6.4 mA/W التي حسبناها من أجل ثنائي ضوئي مفرغ نموذجي في الفقرة (7 ـ 2) . من أجل In Ga As وعند 1.7 μm تقدم كفاءةً مقدارها 80٪ استجابية مقدارها 1.1 A/W . وبموجب منحنى الاستجابة الطيفية ، الشكل (b-6-7) تنقص الاستجابية إلى حوالي 70٪ من هذه القيمة أو 0.77 A/W وعند 1.3 μm تكون استجابة الذروة للجرمانيوم بقرب 1.55 μm حيث تكون كفاءة الكم له حوالي 55٪ . تعطي المعادلة (7 ـ 7) استجابية ذروة في هذه الحالة بحدود 0.7 A/W .

خواص التيار ـ الجهد

يبين الشكل (7 ـ 7) منحنيات خواص التيار ـ الجهد لثنائي سيليكوني يملك استجابية مقدارها 0.5 A/W . عندما يستقطب الثنائي عكسياً نقول انه يعمل بأسلوب التوصيل الضوئي ففي هذا الأسلوب يتناسب تيار الخرج مع القدرة البصرية . وعندما لا يوجد استقطاب عكسي تنتج القدرة البصرية الواردة جهداً أمامياً كما يبدو على الشكل . هذا هو الأسلوب الكهرضوئي الذي

هو أساس الخلايا الشمسية التي تنتج جهوداً كهربائية عندما تتعرض للاشعاع البصري . تعمل مكاشيف الاتصالات الليفية بأسلوب التوصيل الضوئي .

وحتى عندما لا توجد قدرة بصرية يتدفق تيار عكسي صغير خلال ثنائي مستقطب عكسياً ويدعى تيار الظلام المشار إليه بـ I_D في الشكل (7 ـ 7) .



شكل (7 ـ 7) ـ منحنيات خواص التيار ـ الجهد لمكشاف ضوئي سيليكوني .

ينشأ تيار الظلام عن التوليد الحراري لحوامل الشحنة الحرة في الثنائي ويتدفق في جميع الثنائيات حيث يسمى اصطلاحاً تيار التسريب العكسي . وقيمته العظمى التي تحدث عند جهود سالبة كبيرة هي تيار الاشباع العكسي . ان تيار الظلام الناتج عن أصل حراري سيزداد بسرعة مع ازدياد درجة الحرارة ويتضاعف أحياناً من أجل زيادة مقدارها 10°C بقرب درجة حرارة الغرفة (25°C) . تتراوح تيارات الظلام من جزء من النانو أمبير إلى أكثر من بضعة مئات النانو أمبير . تملك المكاشيف السيليكونية عموماً أصغر تيارات ظلام وتملك ثنائيات الـ In Ga As تيارات ظلام أكبر إلى حد ما وتملك ثنائيات الجرمانيوم

أكبر تيارات ظلام . وهذا هو أحد الأسباب الرئيسة لتفضيل ثنائيات السيليكون على ثنائيات الجرمانيوم في مناطق طول الموجة التي تتقارب فيها استجاباتها .

وكما هو متوقع لا يمكن كشف إشارة بصرية صغيرة لأن التيار الضوئي الصغير الذي تولده يمكن أن يُحجَب بتيار الظلام .

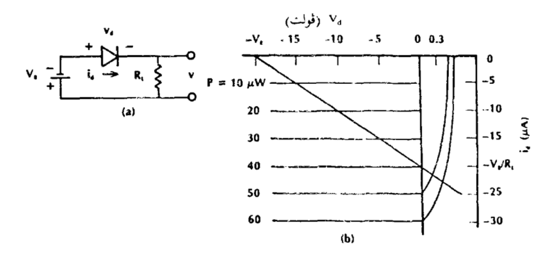
مثال :

ما هي القدرة الدنيا التي يمكن كشفها من أجل ثنائي PIN ذي استجابة مقدارها 0.5 A/W وتيار ظلام مقداره 1 nA .

الحل :

نفترض اننا نستطيع أن نميز وجود القدرة البصرية التي تنتج تيار إشارة مساوٍ إلى تيار الظلام . من المعادلة (7 ـ 7) نجـــد أن : $P=I_D/\rho=2$ nW سنقوم في الفصل 11 بالتحليل الكمي للآثار الحدية لتيار الظلام على نسب الإشارة إلى الضجيج وعلى معدلات الخطأ الرقمية .

يبين الشكل (7 ـ 8) أبسط دارة استقبال PIN ومنحني خواص ثنائي مثالي . تذكر نظرية الحلقة (والمعروفة أيضاً بقانون كرتشوف للجهود) ان



شكل (7 ـ 8) ـ (a) دارة PIN بسيطة . (b) تحليل تخطيطي للدارة .

مجموع الجهود في دارة مغلقة يجب ان يساوي صفراً . وبتطبيق هذه النظرية على الدارة المبينة في الشكل (7 ـ 8) ينتج أن :

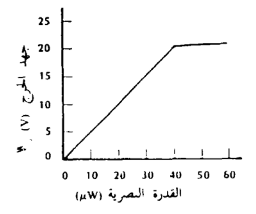
$$V_B + v_d + i_d R_L = 0 \qquad (12\text{-}7)$$

لاحظ أننا قد اعتبرنا ان كلاً من الجهد والتيار موجبان في الاتجاه الأمامي . وسيكون لهما قيم سالبة في هذا التطبيق . وحيث انه يجب أن تتوافق المعادلة (7 ـ 12) بنفس الوقت مع منحنى الخواص فقد رُسمت المعادلة أيضاً على الشكل (7 ـ 8) وقد استعملنا كمثال جهد بطارية (منبع قدرة تيار مستمر) مقداره 20 V ومقاومة حمل مقدارها 1 MΩ . يدعى الخط المستقيم الناتج خط الحمل وهو ذو ميل يساوي $-1/R_L$ ويقطع محور الجهد عند $-V_B$ (وتساوي في هذا المثال -20 V) ويقطع محور التيار عند $-V_B/R_L$ (وتساوي في هذا المثال $-20\ \mu A$) . يمكن من الشكل (b-8-7) أن نستنتج بسهولة خواص النقل التي تبين جهد الخرج v كتابع لقدرة الدخل البصرية . يلخص الجدول (7 ـ 2) بعض الحسابات .

جدول (7 ـ 2) ـ حساب خواص النقل لمكشاف ضوئي PIN

القدرة البصرية μW	جهد الثنائي V	جهد الخرج V
0	−20	0
10	−15	5
20	−10	10
30	−5	15
40	0	20
50	0.3	20.3
60	0.4	20.4

لنوضح كيف حصلنا على هذه الأعداد . إذا كانت القدرة البصرية 10 μW فان خط الحمل يقطع خواص PIN عند جهد ثنائي قيمته 15 V− . وحيث ان جهد البطارية يساوي 20 V يبقى حينئذٍ 5 V على طرفي مقاومة الحمل R_L (5 V− إذا كنا لا زلنا نعامل الطرف العلوي في الشكل a-8-7 كقطب موجب) . ان الأعداد الأخرى في الجدول قد حسبت بطريقة مشابهة . يبين الشكل (7 ـ 9) خواص النقل حيث يبدو أنه عندما تصبح القدرة البصرية كافية



شكل (7 ـ 9) ـ تابع النقل لدارة كشف ضوئية PIN
$R_L = 1\ M\Omega$ والاستجابية 0 5 A/W

(أكثر من 40 μW في هذا المثال) يبدأ الثنائي بالعمل وفق الأسلوب الكهرضوئي وتصبح خواص النقل لا خطية كما يشير إليه المنحنى في الشكل (7 ـ 9) . مع أن المشكلة المألوفة هي قدرة غير كافية فان مصمم الوصلات القصيرة يحتاج أن يتنبه إلى انه يجب الا يُشبع المستقبِل عن غير قصد .

كان من الممكن حساب جهد خرج الدارة في الشكل (a-8-7) من المعادلة (7 ـ 8) $v = \rho P R_L$. لقد استعمل المخطط لشرح الاشباع عند سويات قدرة عالية وكذلك المدى الديناميكي الكبير للمكاشيف الضوئية .

يمكن ان نشغِّل الثنائي عند قدرات أعلى وان نزيد المدى الديناميكي للمستقبل وذلك بتنقيص قيمة مقاومة الحمل . مثلاً بتغيير R_L إلى 10 kΩ في

الشكل (7 ـ 8) (تنقيص بعامل مقداره 100) سيزيد مقدار التيار الأعظمي إلى $V_B/R_L=20/10^4=2$ mA . وحيث ان $i=\rho P$ فان التيار الأعظمي (V_B/R_L) يطابق قدرة دخل عظمى مقدارها :

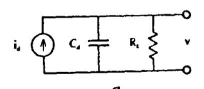
$$P_{max} = \frac{V_B}{\rho R_L} \qquad (13\text{-}7)$$

وباعتبار ان $\rho=0.5$ A/W نجد قيمة قدرة عظمى ما قبل الاشباع مقدارها 4 mW . أما المدى الديناميكي الآن فقد اتسع بعامل مقداره 100 . ما هو الثمن لقاء ذلك ؟ تنقص استجابية الدارة بعامل مقداره 100 كما يمكن ان نرى من المعادلة (7 ـ 8) التي تتناسب فيها نسبة جهد الخرج إلى قدرة الدخل البصرية مباشرة مع مقاومة الحمل أن :

$$\frac{v_{\cdot}}{P} = \rho R_L \qquad (14\text{-}7)$$

سرعة الاستجابة Speed of Response

تحدد سرعة الاسنجابة بواسطة زمن العبور Transit time وهو الزمن الذي تستغرقه الشحنات الحرة لكي تقطع الطبقة الفقيرة . في ثنائي PIN يكون طول المنطقة الفقيرة هو تماماً عرض الطبقة الضمنية . وتتناسب سرعة حوامل الشحنة الحرة خطياً مع مقدار الجهد العكسي وهكذا تؤدي الجهود الأعلى إلى إنقاص زمن العبور . كمثال على ذلك من أجل عرض طبقة فقيرة مقداره 50 μm وسرعة حامل نموذجية مقدارها 5×10^4 m/s يكون زمن العبور $50\times10^{-6}/5\times10^4=1$ ns . وهذا هو تقريباً زمن صعود الثنائي الضوئي . تحد السعة أيضاً من الاستجابة ويمكننا ملاحظة هذا وذلك بفحص الدارة المكافئة للثنائي في الشكل (7 ـ 10) . C_d هي بشكل رئيسي سعة الوصلة وتشكلها طبقتا p و n نصف الناقلة (اللتان تعملان كمسريين) تفصلها المنطقة الضمنية العازلة . وتتضمن C_d أيضاً سعة بنية التعليب . يبين تحليل الدارة قيمة زمن صعود يساوي $R_L C_d$



شكل (7 ـ 10) ـ الدارة المكافئة لثنائي ضوئي PIN . C_d هي سعة الثنائي و i_d هو التيار الضوئي .

من أجل تغير في الجهد بين 0٪ و 63٪ من القيمة العظمى (يدعي $R_L\ C_d$ ثابت زمن الدارة) ومن أجل تغير بين 10٪ و 90٪ من القيمة العظمى يساوي زمن الصعود ما يلي :

$$t_r = 2.19\, R_L\, C_d \qquad (15\text{-}7)$$

يمكن حساب عرض النطاق المطابق مباشرة من الدارة أو يمكن ايجاده من المعادلة (7 ـ 2) وتكون النتيجة كما يلي :

$$f_{3-dB} = \frac{1}{2\pi\, R_L\, C_d} \qquad (16\text{-}7)$$

تملك الثنائيات الضوئية المخصصة للتطبيقات عالية السرعة سعات من فئة بضعة بيكوفاراد أو أقل . من أجل الحصول على سعة منخفضة يجب ان تكون مساحة سطح الثنائي صغيرة . وعلى أي حال من أجل اقتران فعال لا يمكن انقاص المساحة إلى أقل من مساحة نواة الليف البصري الموصل .

ان سرعة الاستجابة يمكن ان تحدد بواسطة زمن العبور أو بواسطة زمن صعود الدارة ـ أيهما أكبر . تتراوح أزمان الصعود المحدودة بزمن العبور من حوالي 0.5 ns إلى 10 ns من أجل ثنائيات PIN سريعة . وقد تم تحقيق أزمان صعود أقل من 100 ps .

مثال :

يملك ثنائي ضوئي PIN سعة مقدارها 5 pF وزمن صعود مقداره 2 ns محدود بزمن العبور . احسب عرض نطاقه الـ 3 dB وأكبر مقاومة حمل يمكن استعمالها دون أن يؤدي ذلك إلى زيادة زمن الصعود بشكل كبير .

الحل :

من المعادلة (7 ـ 2) نجد أن :

$$f_{3-dB} = \frac{0.35}{2\times10^{-9}} = 175\ \text{MHz}$$

لكي يكون زمن الصعود غير مهم يجب ان يكون RC من المعادلة (7 ـ 15) أقل من ربع زمن العبور . يعطي الشرط $2.19\ R_L C_d \leqslant 0.5$ ns قيمة $R_L \leqslant 46\ \Omega$ وهذه قيمة صغيرة .

ان المعايير من أجل اختيار قيمة مقاومة الحمل تلخص في الجدول (7 ـ 3) . وان الفقرة الأخيرة من الجدول المتعلقة بالضجيج ستناقش في البند ([illegible]) .

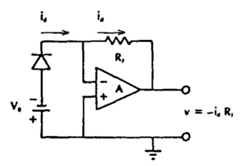
جدول (7 ـ 3) ـ معايير من أجل اختيار مقاومة الحمل

المقاومة المحددّة	الاستنتاج
$V=\rho\ P\ R_L$	اختر R_L كبيرة من أجل جهود خرج عالية
$P_{max}=V_B/(\rho\ R_L)$	اختر R_L صغيرة من أجل مدى ديناميكي كبير
$f_{3-dB}=(2\pi\ R_L\ C_d)^{-11}$	اختر R_L صغيرة من أجل عرض نطاق كبير
$\overline{i^2}_{NT}=4k\ T\ \Delta f/R_L$	اختر R_L كبيرة لكي تخفض تيار الضجيج الحراري

v (جهد الخرج) ، ρ (الاستجابية)، P (القدرة البصرية) ، R_L (مقاومة الحمل) ، V_B (جهد الاستقطاب) ، C_d (سعة الثنائي) ، $\overline{i^2_{NT}}$ (قيمة متوسط مربع تيار الضجيج الحراري) ، k (ثابت بولتزمان) ، T (درجة الحرارة المطلقة) ، Δf (عرض نطاق المستقبل) .

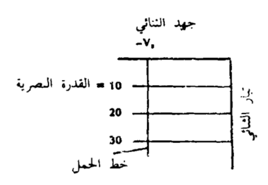
محول التيار إلى جهد Current -to- Voltage Converter

يمكن ان نلاحظ من الشكل (7 ـ 8) ان جهد الثنائي يتناقص عندما تتزايد القدرة البصرية ويعود هذا إلى تزايد التيار المتدفق فيتزايد الجهد على طرفي مقاومة الحمل ويقل ما يتبقى للثنائي من جهد البطارية . تبدأ اللاخطية عندما يهبط جهد الثنائي إلى الصفر . يمكن ان نحل مشكلة الخطية من غير استعمال مقاومة حمل صغيرة وذلك باستعمال محول التيار إلى جهد مرسوم في الشكل (7 ـ 11) . يوصل الثنائي إلى مكبر عملياتي بمقاومة تغذية راجعة R_F . تتميز هذه الدارة بالصفات التالية :



شكل (7 ـ11) ـ محول التيار إلى جهد. (A) هو مكبر عمليات .

1 ـ لا يوجد تقريباً أي هبوط جهد على طرفي مدخل المكبر العملياتي ذي الربح العالي . تعطي نظرية الحلقة أن $v_d = -V_B$ عندما تطبق على حلقة مؤلفة من البطارية والثنائي وطرفي مدخل المكبر . أي أن جهد البطارية يظهر كاملاً على طرفي الثنائي . ان هذا يكافىء العمل على خط حمل عمودي في الشكل (7 ـ 12) .



شكل (7 ـ 12) ـ خط حمل عمودي كما يرى من جهة الثنائي في محول التيار إلى جهد .

2 ـ لا يوجد أي تيار يتدفق إلى طرفي مدخل المكبر تقريباً . ان تيار الثنائي كله يتدفق في مقاومة التغذية الراجعة R_F ويكون الجهد على طرفي هذه المقاومة R_Fi_d . وحيث ان الطرف السالب للمكبر يكون عند كمون الأرض تقريباً فان نظرية الحلقة تبين ان جهد الخرج هو أيضاً R_Fi_d . يمكن ان تكون مقاومة التغذية الراجعة كبيرة (مئات الكيلو أوم إذا رغب ذلك) لكي تنتج جهود خرج كبيرة بدون التأثير على خطية الاستجابة . ان سرعة الاستجابة لهذه الدارة ستحدد بزمن الصعود لمقاومة التغذية الراجعة مصحوبة بسعة التفرع الخاصة بها .

التعليب Packaging

تشبه علب المكاشيف الضوئية تلك المستعملة لثنائيات الـ LED والثنائيات الليزرية إلا ان المتطلبات الأساسية هنا أقل حرجاً . تكون المساحة الفعالة للمكشاف غالباً أكبر من تلك الخاصة بنواة الليف الوارد فيسمح ذلك بشيء من عدم التراصف الجانبي . كذلك فان المكاشيف لا تتقيد بفتحة نفوذ عددية صغيرة فهي تقبل الضوء ضمن مدى زاويّ عريض . ان عدم التراصف الزاوي وعدم المواءمة بين NA الخاصة بكل من الليف والمكشاف ليست مشاكل عسيرة .

تعلّب المكاشيف الضوئية بطرق عديدة نذكر منها ما يلي :

1 ـ يركب الثنائي الضوئي على هيكل ترانزستوري معياري يشبه كثيراً ثنائي الـ LED في الشكل (6 ـ 12) . يلحق بالقبعة المعدنية غطاء زجاجي صافٍ أو عدسة . تعمل العدسة في حال وجودها على تركيز (تبئير) الضوء على المنطقة الفعالة للمكشاف . يمكن للعدسة ان تجمع الضوء من الليف الذي يكون أكبر من المكشاف فتتحسن كفاءة الكشف وتكون القبعة في بعض التصاميم قابلة للإزالة من أجل الحصول على منفذ للثنائي .

2 ـ يمكن ان تتضمن علبة الثنائي الضوئي ذيلاً ليفياً إما بوجود أو بعدم وجود موصل على المخرج .

3 ـ توضع الثنائيات الضوئية داخل علب ذات صفين من الأطراف (بشكل مشابه للشكل 6 ـ 32) من أجل تركيبها على لوحات دارات مطبوعة .

يمكن ان تتضمن بعض علب المكاشيف الضوئية PIN مكبراً متقدماً متكاملاً . وهذه هي بنية مكبر متقدم ومكشاف متكاملين IDP المذكورة في الفقرة (7 ـ 3) . يحول المكبر الداخلي التيار الضوئي للثنائي إلى جهد خرج . يسلك الجهاز كاملاً كمنبع جهد ذي ممانعة منخفضة بالنسبة لبقية دارة الاستقبال . أما دارات الاستقبال فستعالج فيما بعد في الفصل 11 .

(7 ـ 5)ـ الثنائي الضوئي الجرفي Avalanche Photodiode (APD)

ان الثنائي الضوئي الجرفي (APD) هو مكشاف ذو وصلة نصف ناقلة يتمتع بربح داخلي واستجابية تزيد عن استجابية أجهزة الـ pn أو الـ PIN . وحيث ان له ربحاً فانه يشبه الأنبوب المضاعف الضوئي PMT . ان الربح الجرفي هو ، على أي حال ، أقل بكثير مما يوفره الـ PMT وقيمه محددة بعدة مئات أو أقل . ومع ذلك فان هذه الأرباح تجعل أجهزة الـ APD أكثر حساسية بكثير من ثنائيات الـ PIN . وكما ذكر في الفقرة (7 ـ 2) فان الربح الداخلي يعطي نسب إشارة إلى ضجيج أحسن بكثير مما يمكن الحصول عليه بالتكبير الخارجي . سنبرهن على هذا في الفصل 11 .

ان مضاعفة التيار الجرفي تحدث بالطريقة التالية : يُمتص فوتون في المنطقة الفقيرة فينتج الكترون حر وثقب حر . تسبب القوى الكهربائية الكبيرة في المنطقة الفقيرة تسارع هذه الشحنات مكسبة إياها طاقة حركية . عندما تصطدم الشحنات السريعة بالذرات المحايدة تنتج أزواج (الكترون ـ ثقب) إضافية وذلك عن طريق استعمال جزء من طاقتها الحركية لكي ترفع الالكترونات عبر ثغرة نطاق الطاقة . يمكن لشحنة متسارعة واحدة أن تولد عدة شحنات ثانوية جديدة . ويمكن للشحنات الثانوية ذاتها أن تتسارع وتنتج المزيد من أزواج (الكترون ـ ثقب) . وهذه هي عملية التضاعف الجرفي .

يجب أن تكون قوى التسارع قوية لتنقل طاقات حركية كبيرة . يمكن تحقيق ذلك بجهود استقطاب عكسية كبيرة تبلغ في بعض الأحيان بضعة مئات من الفولتات . يتزايد الربح تبعاً لجهد الاستقطاب العكسي V_B وفق التقريب التالي :

$$M = \frac{1}{1 - (V_B / V_{BR})^n} \qquad (17\text{-}7)$$

حيث V_{BR} هو جهد الانهيار العكسي و n هي معلمة (parameter) تحدد تجريبياً وذات قيمة أقل من الواحد . تتراوح جهود الانهيار بين 20 V و 500 V .

يعطى التيار المتولد بواسطة APD ذي ربح M بالمعادلة التالية :

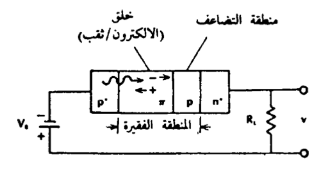
$$i = \frac{M \eta e P}{h f} = \frac{M \eta e \lambda P}{h c} \qquad (18\text{-}7)$$

حيث η هي كفاءة الكَمّ عندما يساوي الربح الواحد . ان هذه النتيجة هي نفس المعادلة (7 ـ 10) التي وردت للمضاعف الضوئي . وتعطى الاستجابة كما يلي :

$$\rho = \frac{M \eta e}{h f} = \frac{M \eta e \lambda}{h c} \qquad (19\text{-}7)$$

وتتراوح الاستجابة الجرفية بين 20 A/W و 80 A/W .

ان الثنائيات الضوئية الجرفية هي عادة أشكال مختلفة من ثنائيات الـ PIN . ان المواد المستعملة وبالتالي الامداء الطيفية هي ذاتها ، يبين الشكل (7 ـ 13) أحد أشكال ثنائي الـ APD وهو ثنائي منشور . ان الطبقتين p^+ و n^+



شكل (7 ـ 13) ـ ثنائي ضوئي جرفي تغلغلي .

هما منطقتان لهما تطعيم عالٍ ومقاومة منخفضة وتملكان هبوط جهد منخفض جداً . أما المنطقة π فهي ضعيفة التطعيم وهي منطقة ضمنية تقريباً . ان معظم الفوتونات تُمتص في هذه المنطقة منتجة أزواج (الكترون ـ ثقب) . وكما يشير الشكل تتحرك الالكترونات المصدَّرة فوتونياً إلى المنطقة p التي كانت قد أصبحت فقيرة الشحنة الحرة بواسطة الجهد العكسي الكبير . وفي الأساس تكون المنطقة الفقيرة عند الوصلة $p\text{-}n^+$ قد بلغت الطبقة π . وان هبوط الجهد يكون بشكل رئيسي عبر الوصلة $p\text{-}n^+$ حيث تؤدي القوى الكهربائية الكبيرة إلى حدوث تضاعف جرفي . في هذا الجهاز يبتدىء التضاعف بواسطة الالكترونات . تساق الثقوب المتولدة في الطبقة π نحو المسرى p^+ إلا انها لا تلعب دوراً في عملية التضاعف . ان البنى التي تقيد بدء التضاعف بنوع واحد من حوامل الشحنة فقط تملك خواص ضجيج متفوقة . وكما هو الحال بالنسبة لثنائي PIN غير المضاعِف تتحدد سرعة الاستجابة لجهاز الـ APD بزمن عبور حامل الشحنة وبثابت الزمن RC . ان الثنائيات الضوئية الجرفية المحددة بزمن العبور متوفرة بأزمان صعود صغيرة تبلغ بضعة أعشار النانو ثانية . لقد تم الوصول إلى أزمان

صعود أقل من 100 ps باستعمال كل من السيليكون والجرمانيوم . تتمتع الثنائيات الضوئية الجرفية بخطية ممتازة ضمن مدى من سويات قدرة بصرية تتراوح بين جزء من نانووات وحتى عدة ميكروووات . وإذا توفر عند المستقبل أكثر من الميكروووات فلا تظهر حينئذٍ الحاجة إلى APD . عند هذه السوية من القدرة تقدم ثنائيات الـ PIN استجابية كافية ونسب إشارة إلى ضجيج عالية وكافية من أجل معظم التطبيقات . إن ربح الثنائي الضوئي الجرفي يعتمد على درجة الحرارة ويتناقص عموماً بارتفاع درجة الحرارة . يحدث هذا بسبب أن المسار الحر الوسطي بين الصدمات يكون أصغر عند درجات حرارة أعلى . ان العديد من حاملات الشحنة لا تحصل على فرصة لكي تصل إلى السرعات العالية المطلوبة من أجل ان تنتج حوامل ثانوية وقد يتطلب الأمر تعويض أو تنظيم درجة حرارة المستقبل APD الذي يعمل ضمن مدى واسع من درجات الحرارة .

(7 ـ 6) ـ الخلاصة

ان العلاقة الرئيسية التي عرضت في هذا الفصل كانت العلاقة بين القدرة البصرية الواردة والتيار الكهربائي المتولد في مكشاف ضوئي . يمكن تلخيص هذه العلاقة بالمعادلة التالية : $i=\rho P$ حيث تتراوح الاستجابية ρ بين 0.5 A/W و 0.7 A/W لثنائيات PIN وتزداد بعوامل تصل حتى بضعة مئات للمكاشيف الجرفية .

إن المكشاف في نظام اتصالات ليفي يمكن ان يكون إما ثنائياً ضوئياً PIN أو جرفياً . ان ثنائي الـ PIN أرخص وأقل حساسية لدرجة الحراة ويتطلب جهد استقطاب عكسي أقل مما يتطلبه ثنائي الـ APD . ان سرعتي الجهازين متقاربة ولذلك يفضل ثنائي الـ PIN في أغلب الأنظمة . تظهر الحاجة إلى APD عندما يُحد النظام بالخسارة كما يحدث في وصلات المسافات الطويلة . لنفترض ان مستقبل APD يمكن ان يكشف بوضوح إشارة ذات قدرة أضعف بمقدار 9 dB من الإشارة التي يمكن أن يكشفها ثنائي PIN . إذا كانت خسارة الليف

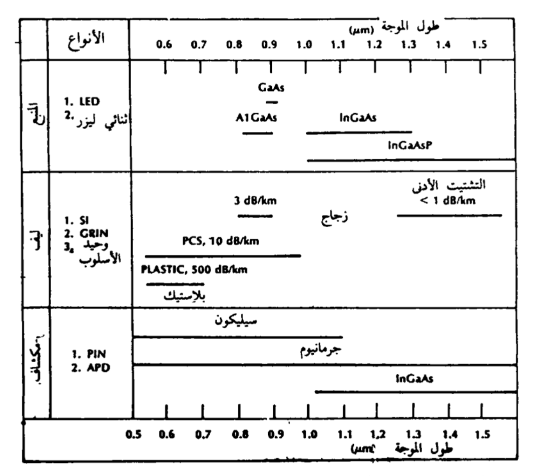
3 dB/km فمكن لوصلة الـ APD أن تكون أطول من وصلة الـ PIN بمقدار 3 km . وبالمثل إذا احتاج الأمر وجود مكررات لدعم سويات القدرة البصرية يمكن عندئذٍ ان تزيد المسافات بين هذه المكررات بمقدار 3 km إذا استعمل مكشاف APD في هذه الحالة .

مع انه يوجد أنواع كثيرة من المكاشيف وخواصها المختلفة . من المفيد اعتبار القيم النموذجية للمعلمات المهمة لمكشاف ضوئي كما يبينها الشكل (7 ـ 4) . ان الاستجابية التي يقدمها الجدول تمثل القيمة عند طول الموجة حيث يمكن ان يستعمل عندها المكشاف وهي بقرب 0.8 μm للسيليكون وبقرب 1.3 μm أو 1.5 μm للجرمانيوم وللـ In Ga As. تهبط الاستجابية عند تحرك طول الموجة نحو حواف الامداء المبينة كما يظهر على الشكل (7 ـ 6) .

يلخص الشكل (7 ـ 14) بعض المعلومات التي جمعناها عن المنابع والألياف والمكاشيف ويمكن من هذا الشكل اجراء اختيار أولي لمركبات متوائمة . يوضح هذا الشكل القرارات العديدة التي يجب ان يتخذها مصمم النظام وتتضمن : ـ طول موجة العمل (مرئية أو نافذة أولى أو نافذة ثانية) ومنبع الضوء (ثنائي ليزر أو LED) ومادة الليف (زجاج أو PCS أو بلاستيك) ونوع الليف (دليل درجي ـ دليل متدرج أو وحيد الأسلوب) والمكشاف الضوئي (PIN أو APD) . ستساعد المادة في الفصول القليلة السابقة في اختيار المركبات المثلى . وعلى أية حال قد نحتاج إلى معلومات أكثر في بعض التطبيقات . مثلاً من أجل تحديد فيما إذا كان APD مطلوباً نحتاج ان نعرف كم هي القدرة المتوفرة عند المستقبل . وهذا بدوره يتطلب ان نعرف كل خسارات النظام وليس فقط تخامد الليف . هذه الخسارات الأخرى تنتج عن اقتران المنبع والتوصيل الدائم والموصلات وأي تجزئة للقدرة من أجل توزيع الإشارة . وإضافة لذلك نحتاج ان نحدد آثار الضجيج . ستجري مناقشة هذه الأمور في فصول لاحقة .

جدول (7 ـ 4) ـ خواص نموذجية لمكاشيف ضوئية ذات الوصلة

المادة	البنية	زمن الصعود ns	طول الموجة nm	الاستجابية A/W	تيار الظلام na	الربح
سيليكون	PIN	0.5	300-1100	0.5	1	1
جرمانيوم	PIN	0,1	500-1800	0.7	200	1
In Ga AS	PIN	0.3	1000-1700	0.6	10	1
سيليكون	APD	0.5	400-1000	77	15	150
جرمانيوم	APD	1	1000-1600	30	700	50



شكل (7 ـ 14) ـ المكونات الرئيسة لنظام اتصالات بالألياف البصرية .

مسائل الفصل السابع

7 ـ 1 ـ ما هي شدة التيار الذي ينتجه مكشاف ضوئي ذو استجابية مقدارها 0.5 A/W إذا كانت سوية القدرة البصرية الواردة هي −43 dBm ؟

7 ـ 2 ـ احسب زمن صعود مكشاف ضوئي إذا كان عرض نطاقه الـ (3-dB) يساوي 500 MHz .

7 ـ 3 ـ احسب طول موجة القطع وتردد القطع لمكشاف ضوئي مفرغ يبلغ تابع عمل مهبطه الضوئي 2×10^{-19} J .

7 ـ 4 ـ اكتب من جديد المعادلة (7 ـ 4) لطول موجة القطع لمكشاف ضوئي (يعتمد مبدأ البث الضوئي) على ان يقدر تابع العمل بالجول وطول الموجة بالمتر .

7 ـ 5 ـ احسب استجابية مكشاف ضوئي مثالي (أي الاستجابية ذات كفاءة الكَمْ تساوي الواحد) وارسمها بيانياً للموجات التي تقع أطوالها بين 0.5 μm و 1.7 μm . لماذا تتزايد الاستجابية وفقاً لتزايد طول الموجة ؟

7 ـ 6 ـ أوجد تيار خرج مكشاف ضوئي ذي كفاءة كَمْ تساوي 0.9 وطول الموجة يساوي 1.3 µm وسوية القدرة الواردة تساوي 37 dBm− . واحسب جهد الخرج الناتج أيضاً إذا كانت مقاومة الحمل 50 Ω و 1000 Ω و 1 MΩ .

7 ـ 7ـ كرِّر المسألة (7 ـ 6) إذا استعمل مضاعف ضوئي ذو أربعة مصاعد جانبية (كل مصعد ذو ربح مقداره 4) . تبلغ كفاءة الكَمْ للمهبط 0.9 .

7 ـ 8 ـ اكتب المعادلة (7 ـ 11) من جديد لأجل موجة القطع لثنائي ضوئي PIN على ان تقدر طاقة ثغرة النطاق بالجول .

7 ـ 9 ـ احسب طاقة ثغرة النطاق بالجول من أجل : أ ـ السيليكون . ب ـ الجرمانيوم .

7 ـ 10 ـ افترض ان تيار الظلام لمكشاف ضوئي PIN هو 0.06 nA عند درجة حرارة 25°C ويتضاعف لكل تزايد مقداره 10° . احسب تيار الظلام وارسمه بيانياً لدرجات حرارة من 25°C إلى 95°C .

7 ـ 11 ـ من أجل المكشاف الضوئي PIN جرمانيوم الموصوف في الجدول (7 ـ 4) ، ما مقدار القدرة البصرية المطلوبة لانتاج تيار ضوئي مساوٍ إلى تيار ظلام المكشاف .

7 ـ 12 ـ اعتبر دارة مكشاف PIN كالمرسوم في الشكل (7 ـ 8) . جهد البطارية هو 10 V ومقاومة الحمل هي 2 MΩ واستجابية المكشاف هي 0.25 A/W وتيار الظلام هو 0.5 nA .

أ ـ ارسم خواص التيار ـ الجهد للثنائي في منطقة التوصيل الضوئي من أجل سويات قدرة واردة تتراوح بين 5 µW و 50 µW وبفارق 5 µW .

ب ـ ارسم خط الحمل على المنحنى في الجزء ـ أ ـ.
ت ـ ارسم منحنى جهد الخرج بدلالة قدرة الدخل البصرية .
ث ـ عند أية قيمة من القدرة البصرية يتشبع المكشاف ؟

7 ـ 13 ـ افترض ان ثنائياً ضوئياً PIN ذو عرض منطقة فقيرة مقداره 30 μm وسرعة حامل مقدارها 5×10^4 m/s وسعة وصلة مقدارها 6 pF .
أ ـ احسب عرض النطاق المحدد بزمن العبور .
ب ـ ما هي أكبر مقاومة حمل لا تؤثر على عرض النطاق المحسوب سابقاً ؟
ت ـ ما هو عرض النطاق إذا كانت مقاومة الحمل 10,000 Ω ؟

7 ـ 14 ـ احسب استجابية ثنائي ضوئي جرفي (APD) سيليكوني يعمل عند طول موجة $\lambda=0.82\ \mu m$ وذي كفاءة كَمْ تساوي 0.8 وربح يساوي 100 .
ما مقدار القدرة البصرية المطلوبة لهذا المكشاف لكي ينتج 20 nA ؟

7 ـ 15 ـ احسب استجابية APD نوع In Ga As يعمل عند : $\lambda=1.55\ \mu m$ وذي كفاءة كَمْ تساوي 0.7 وربح يساوي 10 . ما مقدار القدرة البصرية المطلوبة لهذا المكشاف لكي ينتج 20 nA ؟

المراجع

الفصل السابع

1. Photodetectors are covered in numerous books. These include:
Tien Pei Lee and Tingye Li. "Photodetectors." In *Optical Fiber Telecommunications,* edited by Stewart E. Miller and Alan G. Chynoweth. New York: Academic Press, Inc., 1979. pp. 593-626.
D. P. Schinke, R. G. Smith, and A. R. Hartman. "Photodetectors." In *Semiconductor Devices for Optical Communication,* edited by H. Kressel. Berlin: Springer-Verlag, 1980. pp. 63-87.
Joseph T. Verdeyen. *Laser Electronics.* Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc., 1981.

الفصل الثامن

القوارن والموصلات
Couplers and Connectors

تكون التوصيلات في الأنظمة المعدنية بسيطة عادة حيث يمكن وصل الأسلاك وصلاً دائماً باللحام بسهولة تامة وحتى انه يمكن الا يتم هذا الوصل الدائم ونكتفي فقط بصهر مادة اللحام . ان الخسارات في وصلة لحام تكون صغيرة للغاية لدرجة انها لا تؤخذ بعين الاعتبار عادة في تصميم النظام . إن الموصلات القابلة للفك من أجل الأسلاك تكون أيضاً بسيطة وسهلة التوصيل وذات وثوقية واقتصادية ومن غير خسارة عملياً . لا تجد هذه الصفات المميزة للموصلات السلكية ما يقابلها في مثيلاتها الليفية . سنرى ما هي المشاكل القائمة في التوصيل الدائم والمؤقت للألياف وكيف يمكن بالحرص الكافي التغلب عليها .

يحتاج الأمر إلى توصيل ليف إلى ليف لأسباب عديدة. يجب إجراء التوصيل الدائم للعديد من الألياف مع بعضها من أجل وصلات تزيد عن بضعة كيلومترات وذلك لأن المصنّع عادة ينتج فقط ليفاً متواصلاً محدود الطول . من الأسهل سحب الأطوال المعتدلة من الليف ضمن المجاري من سحب الكابلات

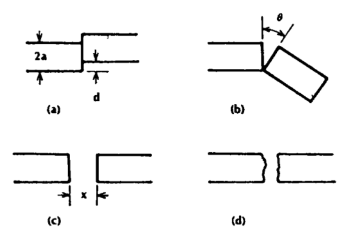
الطويلة جداً وكذلك تسهّل الأطوال المعتدلة عمليات التركيب الهوائية أو المطمورة .

إن اقتران الضوء من المنبع إلى الليف يمكن أن يكون غير فعال كثيراً . سنقوم بتقويم خسارات الاقتران بالمنبع وكذلك بوصف التقنيات من أجل إنقاصها .

يتم عند المستقبل اقتران الضوء من الليف إلى سطح المكشاف ويمكن اختيار هذا السطح بحيث يكون أكبر من نواة الليف فينتج اقتراناً فعالاً جداً . تحدث خسارة بسيطة بسبب الانعكاسات عند السطوح الفاصلة بين ليف وهواء (من الليف إلى الهواء) وكذلك بين هواء ومكشاف (من الهواء إلى المكشاف) . يمكن إزالة هذه الخسارة بإملاء الثغرة الهوائية بمادة ذات دليل موائم . أو بتغليف سطح المكشاف بغلاف مضاد للانعكاس . وعلى أية حال ليس اقتران المكشاف صعباً ولا يحتاج إلى مزيد من النقاش .

(8 ـ 1) ـ مبادىء الموصل Connector Principles

تظهر الخسارات في توصيل ليف إلى ليف بعدة طرق وتكون العوامل الرئيسة في ذلك عيوب النوى وعدم تراصفها كما يبينه الشكل (8 ـ 1) . تتطلب



شكل(8 ـ 1) ـ مصادر الخسارة في توصيل ليف إلى ليف . (a) ـ عدم تراصف جانبي . (b) ـ عدم تراصف زاوي . (c) ـ ثغرة بين الأطراف . (d) ـ أطراف غير مسطحة .

الوصلة التامة تراصفاً جانبياً (أو محورياً) وتراصفاً زاوياً (محاور ليف متوازية) وأطرافاً متماسّة (من غير ثغرة) وأطرافاً متوازية وملساء . يمكن ان تنقص كفاءة الاقتران عند توصيل ألياف ذات فتحات نفوذ عددية مختلفة أو أقطار نوى مختلفة . ويزداد مقدار الخسارة عند توصيل نوى ذات مقاطع إهليليجية (ليست دائرية) إذا لم يتحقق التراصف بين محاورها الرئيسة . وإذا لم تكن النواة مركزية بالنسبة للكساء وإذا كان محيط الكساء يستعمل كمرجع من أجل تراصف الوصلة فإن الخسارة تزداد . يمكن باتباع الحرص الإنقاص حتى الحد الأدنى من هذه المشاكل وانتاج وصلات دائمة بخسارات من فئة 0.1 dB وموصلات غير دائمة يمكن إعادة استعمالها بخسارات أقل من 1 dB .

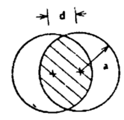
إن التحاليل النظرية للخسارات التي يسببها تنوع التقنيات التي نوقشت معقدة بسبب حقيقة أن كفاءة الاقتران تعتمد على توزع القدرة خلال وجه طرف الليف . إن هذا النمط ليس معروفاً عادة ويعتمد على طريقة الإثارة وعلى طول الليف من نقطة الإثارة حتى الوصلة . مثلاً ، في ليف متعدد الأساليب يسبب اقتران الأسلوب تغير التشوه الشكلي على طول الليف حتى الوصول إلى طول التوازن (الموصوف في الفقرة 5 ـ 6) . لذلك تعتمد خسارات الموصل على المسافة بين نقطة الإثارة والموصل ذاته . من أجل مسارات أطول من طول التوازن ستستقر الخسارة عند قيمة محددة . مما يثير الدهشة ان كفاءة الاقتران تعتمد أيضاً على طول الليف الذي يلي الوصلات . إن الأساليب ذات المرتبة الأعلى والأساليب الكسائية (Cladding modes) التي يمكن ان تثيرها عيوب في الوصلة يتم إرسالها بكفاءة لمسافات قصيرة فقط بعد نقطة الوصل . تحتوي القدرة المقيسة قرب نقط الوصل على هذه الأساليب فيبدو أن الخسارة تكون صغيرة . إن القياسات بعيداً عن الوصلة سوف تستبعد الكثير من القدرة في هذه الأساليب مشيرة إلى خسارة وصل أكبر .

بتذكرنا لهذه العوامل سنباشر مناقشة الخسارات تحت شروط مثالية مفترضة . مع انه لا يمكن أبداً تحقيق هذه الشروط تماماً فإن النتائج ستعطينا بعض الفهم لحساسية الوصلات غير الدائمة لتقنيات الخسارة المختلفة . يمكن

أن تستعمل هذه المعلومات كمرشد من قبل مصممي الوصلات الدائمة والموصلات ومن قبل محللي النظام الذي يجب ان يقدروا غالباً الخسارة الاجمالية في نظام ما .

عدم التراصف الجانبي Lateral Misalignment

إن نموذجاً بسيطاً يفترض ان القدرة موزعة بانتظام خلال نواة الليف . ان هذا التقريب مناسب كثيراً من أجل ليف ذي دليل درجي متعدد الأساليب . بهذا الافتراض تعود خسارة عدم التراصف الجانبي ببساطة إلى عدم تراكب نواتي الليف المرسل والليف المستقبل كما يبينه الشكل (8 ـ 2) . إن كفاءة الاقتران η



شكل (8 ـ 2) ـ تراكب ليف مرسل مع ليف مستقبل . تتباعد النواتان بمسافة d .

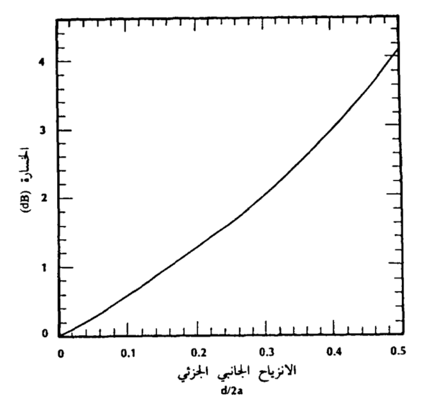
هي نسبة مساحة التراكب (المبينة بالمساحة المهشرة) إلى مساحة النواة ويمكن حسابها كما يلي :

$$\eta = \frac{2}{\pi} \left\{ \cos^{-1} \frac{d}{2a} - \frac{d}{2a} \sqrt{\left[1 - \left(\frac{d}{2a}\right)^2\right]} \right\} \qquad (1\text{-}8)$$

حيث يحسب التجيب المعكوس بالراديان . تكون الخسارة بالديسيبل كما يلي :

$$L = -10 \log \eta \qquad (2\text{-}8)$$

سنستعمل في كتابنا هذا L للتعبير عن الخسارة بالديسيبل . يبين الشكل (8 ـ 3) رسماً بيانياً لخسارة عدم التراصف المحوري . من أجل إزاحات صغيرة



شكل (8 ـ 3) ـ خسارة عدم التراصف المحوري لليف SI متعدد الأساليب .

(d/2a < 0.2) يمكن تقريب المعادلة (8 ـ 1) بالعلاقة التالية :

$$\eta = 1 - (2d/\pi a)$$

مثال :

ما هو مقدار الإزاحة المحورية المسموح بها إذا كانت خسارة الاقتران أقل من 1 dB علماً بأن قطر النواة يساوي 50 μm ؟ كرر المطلوب من أجل خسارة مقدارها 0.5 dB و 0.1 dB .

الحل :

يمكن استعمال إما الشكل (8 ـ 3) أو المعادلتين (8 ـ 1) و (8 ـ 2) من أجل إيجاد ما يلي :

L (dB)	d / 2a	d (μm)
1	0.16	8
0.5	0.09	4.5
0.1	0.02	1

تبين هذه الأرقام مقدار الحذر الضروري من أجل التراصف المناسب لمحاور الألياف التي يجري توصيلها .

لقد حددنا في الفصلين الرابع والخامس ان الأساليب ذات المرتبة الأعلى تتخامد بشكل أقوى من الأساليب ذات المرتبة الأدنى وانها تحتوي قدرة أكبر قرب سطح الفصل بين النواة والكساء . يمكن ان نستنتج ان كثافة القدرة عند نهاية كابل طويل ستكون عند حواف النواة أقل منها عند النقاط الأقرب إلى مركزها . من أجل إزاحات محورية صغيرة تفقد فقط حواف نواة الإرسال ليف الاستقبال . وحيث ان الحافة تحتوي قدرة أقل مما هو مفترض في المعادلة (8 ـ 1) فان الخسارة الفعلية ستكون أقل مما هو متوقع نظرياً . وبتذكرنا ما سبق يمكن ان نستعمل نظرية التراكب المنتظم كتقدير متحفظ للخسارات الفعلية عند توصيل ألياف SI متعددة الأساليب .

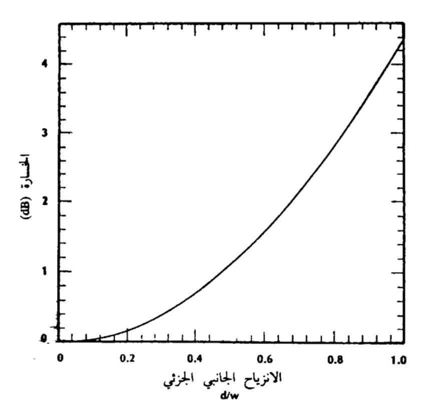
تبدي الألياف ذات الدليل التدرجي (GRIN) متعددة الأساليب مشاكل نظرية أكثر مما تبديه ألياف الـ SI وذلك لأن فتحة النفوذ العددية لـ GRIN تتغير عبر وجه النواة كما توضحه المعادلة (5 ـ 5) من أجل منظر جانبي على شكل قطع مكافىء عندما يتقابل الليفان دون انزياح بينهما تتواءم فتحة النفوذ العددية (NA)لكل من المرسل والمستقبل عند كل نقطة داخل النواة . وعلى أي حال في حال وجود انزياح يحدث عدم تواؤم الـ NA عند كل نقطة تقريباً . عند تلك النقط التي يكون فيها NA المستقبل أكبر من NA المرسل فانه يحدث انتقال كل القدرة . وعند النقط التي تكون فيها NA المستقبل أقل من NA المرسل فانه يضيع بعض القدرة . ان الكفاءة الجزئية عند هذه النقط تساوي إلى نسبة

مربعي فتحتي النفوذ الموضعية . من أجل حساب كفاءة الاقتران علينا ان نحسب متوسط الكفاءات الموضعية وذلك بعد تقديرها وفق توزع القدرة خلال الوَجه الطرفي . وكما جرت مناقشته سابقاً في هذه الفقرة ليس هذا التوزع على العموم معروفاً مما لا يشجع بالقيام بتحليل شامل .

تعتمد خسارة الانزياح لألياف وحيدة الأسلوب على شكل أسلوب الانتشار . تكون الحزم في كل من ألياف SI والألياف ذات الدليل على شكل قطع مكافىء غوسيّة تقريباً .

إن الخسارة بين ألياف متماثلة هي كما يلي :

$$L = -\ 10 \log \{ \exp . [-(d/w)^2] \} \quad (3\text{-}8)$$



شكل (8 ـ 4) ـ خسارة عدم التراصف الجانبي لألياف وحيدة الأسلوب ذات حجم بقعة شكلي w .

حيث w هي حجم البقعة المحدد في الفقرة (5 ـ 2) . من أجل ألياف SI تعمل قرب تردد مقيّس V (normalized) بقيمـة 2.405 (وهو شرط القطع وحيد الأسلوب الذي ورد في الفقرة 5 ـ 4) يبلغ حجم البقعة حوالي 1.1 مرة نصف قطر النواة. يبين الشكل (8 ـ 4) خسارة الإزاحة المحورية وحيدة الأسلوب. حيث ان حجم البقعة يبلغ فقط بضعة ميكرونات فاننا ندرك ان الاقتران الفعال لألياف وحيدة الأسلوب يتطلب درجة عالية جداً من الدقة الميكانيكية . من أجل خسارة مقدارها 1 dB تعطي المعادلة (8 ـ 3) أو الشكل (8 ـ 4) قيمة : d/w=0.48 . إذا كان حجم البقعة 4 μm يبلغ عدم التراصف المسموح به 1.9 μm فقط .

عدم التراصف الزاوي Angular Misalignment

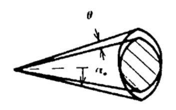
تعطى كفاءة الاقتران العائدة لعدم تراصف زاويّ صغير لألياف SI متعددة الأساليب بالمعادلة التالية :

$$\eta = 1 - \frac{n_0 \Theta}{\pi NA}$$

حيث n_0 هو دليل الانكسار للمادة التي تملىء الأخدود الذي يشكله الليفان و Θ هي زاوية عدم التراصف مقدرة بالراديان . وتكون الخسارة كما يلي :

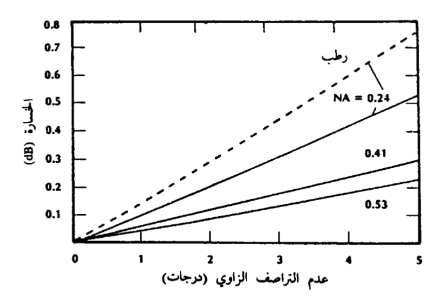
$$L = -10 \log \left(1 - \frac{n_0 \Theta}{\pi NA}\right) \qquad (4\text{-}8)$$

لقد وجدت الكفاءة من حساب تراكب مخروطي الإرسال والاستقبال كما يبينه الشكل (8 ـ 5) وذلك بافتراض توزع قدرة منتظم



شكل (8 ـ 5) ـ تراكب مخروطي الإرسال والاستقبال . $NA=n_0 \sin \alpha_0$ و Θ هي زاوية الميل .

يبين الشكل (8 ـ 6) رسماً بيانياً للمعادلة (8 ـ 4) من أجل ألياف الزجاج (NA=0.24) ومن أجل ألياف PCS (NA=0.41) ومن أجل ألياف بلاستيكية (NA=0.53) المعروضة في الجدول (5 ـ 1) . رسمت الخطوط المستمرة بافتراض عدم وجود مادة في الأخدود ($n_0=1$) . يبين الخط المقطع ان الخسارة الزاوية تتزايد عندما يوجد سائل ذو دليل انكسار بقيمة 1.5 . ستوضح الغاية من هذا السائل في هذه الفقرة فيما بعد . لاحظ كيف ان الخسارة الزاويّة تتناقص من



شكل (8 ـ 6) ـ خسارة عدم التراصف الزاوي من أجل ألياف SI متعددة الأساليب يطبق المنحنى المقطّع عندما يملأ الثغرة سائلٌ ($n_0=1.5$) .

أجل فتحات نفوذ أكبر . يفسر هذا ببساطة بأن الألياف ذات NA كبيرة تنشر إشعاعها المرسل (والمستقبل) على مدى زاويّ كبير . ولذلك فان خطأً زاوياً صغيراً سيؤثر فقط بنسبة صغيرة من القدرة الكلية .

لم تُغط خسارات عدم التراصف الزاوي لألياف GRIN بسبب الصعوبات النظرية المذكورة سابقاً في هذه الفقرة .

تبلغ خسارة عدم التراصف الزاوي لألياف وحيدة الأسلوب ما يلي :

$$L = -10 \log \{ \exp [-(\pi n_2 w \Theta/\lambda)^2] \} \qquad (5\text{-}8)$$

حيث تعطى Θ بالراديان و w هو حجم البقعة الغوسيّة و n_2 هو دليل انكسار الكساء . تأتي المركبة الأسيّة في المعادلة (8 ـ 5) من نسبة زاوية عدم التراصف إلى نصف زاوية تباعد الحزمة الغوسيّة الذي أشرنا إليه بالحد $\lambda/\pi w$ في المعادلة (2 ـ 17) . يبين الشكل (8 ـ 7) الخسارة من أجل ليفين SI مختلفين يملك كل منهما تردداً مقيّساً بقيمة 2.4 ودليل كساء بقيمة 1.46 . كما هو الحال في الحالة متعددة الأساليب تزداد الخسارة بسرعة أكبر من أجل الليف ذي فتحة النفوذ الأصغر . يوضح المثال التالي بعض الحسابات التي أجريت من أجل تكوين الشكل (8 ـ 7) .

مثال :

ليف SI ذو $n_1=1.465$ و $n_2=1.46$ وتردد مقيّس 2.4 . احسب نصف قطر نواته وفتحة نفوذه وحجم بقعته عند $0.8\ \mu m$.

الحل :

من المعادلة (4 ـ 21) نجد :

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = 0.12$$

ومن المعادلة (5 ـ 7) ومن أجل $V=2.4$ نجد :

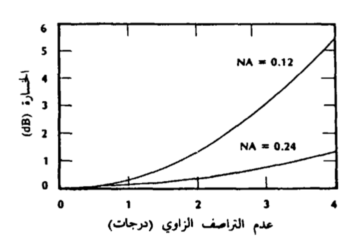
$$a = \frac{\lambda V}{2\pi\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}} = 2.53\ \mu m$$

عندما تكون : V=2.4 و w/a=1.1 يكون حجم البقعة هو :

$$1.1\ (2.53) = 2.78\ \mu m$$

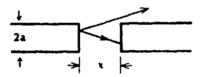
الفصل بين الأطراف End Seperation

عندما يوجد ثغرة بين ليفين تم توصيلهما تحدث ظاهرتي خسارة واضحتين . أولاً : يوجد سطحان بين الوسط الليفي والهواء . لقد حسبنا في الفقرة (5 ـ 3) انعكاسية مقدارها 4% (0.177 dB) عند سطح فاصل هواء ـ زجاج لذلك يقدم السطحان العاكسان معاً خسارة بحدود 0.35 dB . يوجد طريقة واحدة لإلغاء هذه الخسارة وذلك بإملاء الثغرة بسائل مواءمة الدليل وهو سائل شفاف ذو دليل انكسار يساوي دليل انكسار نواة الليف . يتحقق هذا غالباً (لكن ليس دائماً) في الوصلات الدائمة الفعلية والموصلات . وكما يشير إليه الشكل (8 ـ 6) يزيد السائل حساسية الاتصال لعدم التراصف الزاويّ .



شكل (8 ـ 7) ـ خسارة عدم التراصف الزاوي لألياف وحيدة الأسلوب, n_2=1.46, w/a=1.1, V=2.4, λ=0.8 μm

يبين الشكل (8 ـ 8) آلية الخسارة الثانية . عندما توجد ثغرة ما لا يحدث اعتراض بعض من الأشعة المرسلة بواسطة الليف المستقبل . وعندما تكبر الثغرة تضيع كميات أكبر من القدرة المرسلة عن نواة الليف بسبب تباعد الحزمة .

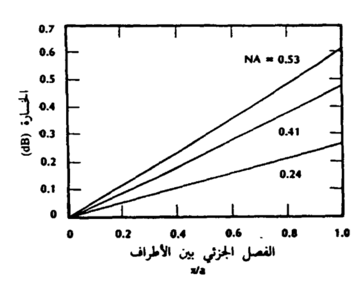


شكل (8 ـ 8) ـ تسمح الثغرة لبعض من الأشعة المرسلة بالهروب .

وسيكون للألياف ذات فتحات النفوذ الأكبر خسارات فصل أكبر وذلك لأن حزمها تتباعد بشكل أسرع . تعطى الخسارة من أجل فواصل صغيرة بالاعتماد على توزع القدرة المنتظم كما يلي :

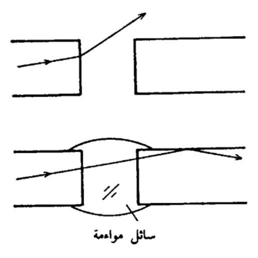
$$L = -10 \log \left(1 - \frac{x\,NA}{4a\,n_0}\right) \qquad (6\text{-}8)$$

حيث : n_0 هو دليل الانكسار لسائل المواءمة . يبين الشكل (8 ـ 9) النتيجة من أجل الألياف الزجاجية والـ PCS والبلاستيكية المعروضة في الجدول (5 ـ 1) في



شكل (8 ـ 9) ـ خسارة الفصل بين الأطراف من أجل ألياف SI متعددة الأساليب .

حال عدم وجود سائل مواءمة (n_0=1). تبين المعادلة (8 ـ 6) أن سائل مواءمة الدليل سينقص خسارة الثغرة . هذا بالإضافة إلى النقص في خسارة الانعكاس العائد إلى السائل . يمكن توضيح هذا السلوك بالإشارة إلى الفقرة (2 ـ 1) حيث كنا قد وجدنا ان أشعة تنتشر من وسط ذي دليل مرتفع (نواة الليف) إلى وسط ذي دليل أصغر (الهواء) ستنحني مبتعدة عن العمود (كما يبدو في الشكل 2 ـ 10) . تتباعد الحزمة المشَعَّة بسرعة أكبر في منطقة الهواء مما هو عليه في الليف . يمنع السائل هذا الأمر من الحدوث (كما يبدو في الشكل) . وكلما كان تباعد الحزمة أقل كلما ازداد المقدار من الأشعة المرسلة التي تتعارض مع الليف المستقبل .



شكل (8 ـ 10) ـ يساهم سائل مواءمة الدليل في إنقاص خسارة فصل الليف وذلك عن طريق انقاص تباعد الحزمة .

تشير مقارنة الأشكال (8 ـ 3) و (8 ـ 6) و (8 ـ 9) إلى الحساسية النسبية لوصلات ليف SI متعدد الأساليب إلى أنواع عدم التراصف المختلفة . يعتبر عدم التراصف المحوري الخطأ الأكثر تأثيراً .

مثال :

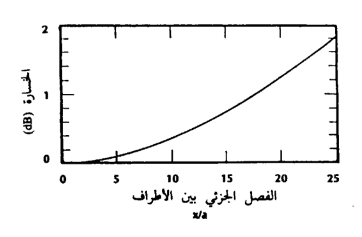
احسب عدم التراصف المسموح به من أجل ليف SI متعدد الأساليب إذا سمح لكل نوع من الخطأ ان يسـهم بخسارة مقدارها 0.25 dB . علماً ان نصف قطر النواة 50 μm و NA=0.24 .

الحل :

من أجل خسارة مقدارها 0.25 dB يبلغ الانزياح الجانبي من الشكل (8 ـ 3) d/2a=0.045 ويبلغ عدم التراصف الزاوي من الشكل (8 ـ 6) 2.4° ويبلغ الفصل بين النهايات من الشكل (8 ـ 9) x/a=0.94 . تنتج هذه القيم التسامحات التالية : انزياح جانبي d=4.5 μm وزاوية عدم تراصف Θ=2.4° وفصل بين النهايات x=47 μm . وتبلغ خسارة الثغرة من أجل ألياف وحيدة الأسلوب ما يلي :

$$L = -10 \log \frac{4\,(4 Z^2 + 1)}{(4 Z^2 + 2)^2 + 4 Z^2} \qquad (7\text{-}8)$$

حيث : $Z = x\,\lambda / 2\,\pi\,n_2\,w^2$



شكل (8 ـ 11) ـ خسارة الفصل بين الأطراف من أجل SI وحيد الأسلوب, w/a=1.1
V=2.4, NA=0.12, n_2=1.46, n_1=1.465, λ=0.8 μm

تظهر هذه النتيجة على الشكل (8 ـ 11) من أجل ليف ذي NA=0.12 . من أجل هذا المثال تنتج ثغرة قيمتها عشرة أمثال نصف قطر النواة خسارة أقل من 0.4 dB . نستنتج ان الثغرة ليست خطرة جداً . وكما هو الحال في الألياف متعددة الأساليب يكون عدم التراصف المحوري هو الأمر الأكثر خطورة .

الأطراف المتوازية والملساء Smooth and Parallel Ends

يسبب الانتثار من وجه طرف خشن خسارة كبيرة . وكذلك فان الأطراف غير المتوازية التي تشكلها سطوح هذه الأطراف والتي لا تشكل زاوية قائمة مع محور الليف (كما يبينه الشكل 8 ـ 12) تزيد من خسارة التوصيل . يعمل سائل المواءمة على حل هذه المشاكل وذلك بواسطة إملاء السطوح غير المستوية . وأيضاً بإزالة الميل بشكل فعال . وعلى أي حال من أجل تحقيق خسارات توصيل منخفضة جداً يجب ان تكون نهايات الليف ملساء ومتوازية . سنقوم في الفقرة التالية بوصف التقنيات الخاصة من أجل تحقيق هذه النتيجة .



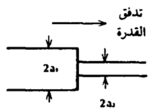
شكل (8 ـ 12) ـ يساهم الوجه المائل للنهاية في حدوث الخسارة .

توصيل الألياف المختلفة

تشيع التوصيلات بين ألياف ذات فتحات نفوذ مختلفة أو أقطار نوى مختلفة . مثلاً : يمكن ان يتوفر منبع مذنّب ذو ليف مختلف عن ذلك المستعمل لأجل قناة المعلومات . وكذلك فان فروقاً غير مقصودة في أقطار الألياف تكون متوقعة أيضاً . تبلغ الخسارة عند الإرسال من ليف ذي نصف قطر نواة a_1 إلى ليف ذي نصف قطر نواة a_2 ما يلي وذلك في حال أن $a_1 > a_2$:

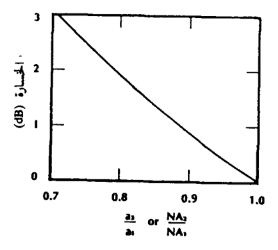
$$L = -10 \log \frac{a_2^2}{a_1^2} \qquad (8\text{-}8)$$

أما عندما يكون ليف الاستقبال أكبر من ليف الإرسال فانه لا تحدث أية خسارة وتكون الخسارة بهذا الخصوص وحيدة الاتجاه . ان هذه النتيجة هي ببساطة عبارة عن حساب الجزء من مساحة نواة الإرسال التي يجري اعتراضها بواسطة ليف الاستقبال كما يبدو على الشكل (8 ـ 13) . يوافق هذا الحساب



شكل (8 ـ 13) ـ يمكن ان تسهم النوى غير المتوافقة في حدوث الخسارة .

الألياف ذات الدليل الدرجي SI أو الدليل المتدرج GRIN طالما أن المظهر الجانبي لدليل الليف الثاني هو نسخة طبق الأصل عن الأول (مخفض بنسبة نصفي قطري النواتين a_2/a_1) . يفترض في هذا التحليل ان جميع الأساليب المسموح بها قد أثيرت بالتساوي . يبين الشكل (8 ـ 14) رسماً بيانياً للمعادلة (8 ـ 8) .



شكل (8 ـ 14) ـ الخسارة الناتجة عن عدم تساوي أنصاف أقطار النوى وكذلك عدم تساوي فتحات النفوذ .

ان بعضاً من الأشعة الصادرة عند الإرسال من ليف ذي فتحة نفوذ كبيرة إلى ليف ذي فتحة نفوذ أصغر سيقع خارج زاوية القبول لليف الاستقبال كما يبينه الشكل (8 ـ 15) . تبلغ الخسارة إذا كانت $NA_1 > NA_2$ ما يلي :

$$L = -10 \log \frac{NA_2}{NA_1} \qquad (9\text{-}8)$$

شكل (8 ـ 15) ـ يمكن ان تسهم فتحات النفوذ العددية غير المواءمة في حدوث الخسارة .

وإذا كانت NA للمستقبل أكبر من NA للمرسل فلا تحدث أية خسارة . يبين الشكل (8 ـ 14) رسماً بيانياً للمعادلة (8 ـ 9) وذلك بافتراض توزع شكلي منتظم أيضاً . ان هذا الافتراض ينطبق على ألياف SI وألياف GRIN . من أجل ألياف GRIN تستعمل فتحة النفوذ على المحور ويجب ان يكون معامل المنظر الجانبي α المعرّف في المعادلة (5 ـ 3) ذاته لكلا الليفين . عندما تتدفق القدرة من ليف SI إلى ليف GRIN قطع مكافىء وفي حال أن كلاً من الليفين يملكان NA المحورية ذاتها ونصف قطر النواة ذاته فان الخسارة تبلغ 3 dB . تحدث الخسارة بسبب أن NA لليف GRIN المستقبل تتناقص نحو الصفر عند حافة نواته بينما يشع ليف SI بنفس قيمة NA من كل نقاط حافته . ان القدرة تتدفق من ليف GRIN إلى ليف SI بدون خسارة .

من الجدير بالاهتمام ان نكرر التحذير المذكور في بداية هذه الفقرة . ان التحليل السابق يقرب فقط سلوك الوصلات الفعلية من ليف إلى ليف . ان

الاتجاهات التي لاحظناها يجب ان تكون صحيحة إلا ان النتائج العددية يجب استعمالها بحذر .

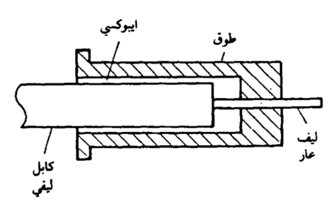
(8 ـ 2) ـ تحضير طرف الليف Fiber End Preparation

ان الطريقتين المميزتين لتحضير طرف الليف هما : طريقة الخدش والقطع وطريقة الصقل والتلميع . ان طريقة الخدش والقطع عمليّة جداً عندما يتطلب الأمر التوصيل الدائم للألياف فيما بينها بينما تظهر الحاجة إلى طريقة الصقل والتلميع عندمايربط طرف الليف بشكل دائم إلى جسم الموصل . ان الاجراءات التي سنقوم بوصفها أولاً يمكن تطبيقها على جميع الألياف الزجاجية .

يجب في الطريقتين كلتيهما تعرية الليف أولاً . يمكن إزالة أي مادة تغليف أو أسلاك تقوية (Kelvar) أو أي مادة عائقة وذلك بواسطة أدوات تعرية الأسلاك أو شفرات حلاقة أو أداة حادة أخرى . يمكن فيما بعد تنظيف الليف الزجاجي المعرّى بمنظفات كيميائية حيث يمكن مسحه مثلاً بكحول إيزوبروبيل (isopropyl) .

في طريقة الخدش والقطع تُحزّ الحافة الخارجية للكساء بواسطة أداة صلبة مثل شفرة ذات حافة ماسـيّة أوشفرة من الصفير (الياقوت الأزرق) أو كاربايد التنغسـتين . يمكن سحب الشفرة على ليف ثابت أو سحب الليف على شفرة ثابتة . وفي الحالتين يجب ان يخضع الليف لشد معتدل خلال عملية القطع . وبعد الحز يُزاد الشد بواسطة السحب إلى ان ينقطع الليف . ان القوة النموذجية لذلك هي أكبر قليلاً من 1.47 N (0.15 kg أو 0.33 lb) . تنتج هذه التقنية عندما تنجز بشكل مناسب سطحاً مستوياً صقيلاً . يمكن للعمال المتمرنين إكمال العملية يدوياً خلال عدة دقائق فقط فيحصلون على وجوه ملساء للأطراف متعامدة مع محور الليف . تتوفر أيضاً تجهيزات تجارية يمكن ان تنجز ميكانيكياً عملية الخدش والقطع . وبغض النظر عن الطريقة المستعملة يجب فحص الطرف بعناية للتأكد من الحصول على قطع نظيف وصقيل .

ان تقنية الخدش والقطع هي الطريقة الأسرع والأرخص لتحضير الألياف من أجل التوصيل . عندما يتطلب الأمر أن يكون الليف جزءاً من موصل قابل للفك يمكن أن تلي هذه التقنية عمليةُ الصقل والتلميع . يوجد العديد من الموصلات المختلفة ولكل منها طريقة ربط وتلميع حسب تصميمه الخاص . يمكن وصف طريقة تحضير عامة تطبق على معظم الموصلات . يجب إدخال الليف العاري في طوق (ويكون عادة من المعدن أو البلاستيك) يحفظ الليف الحساس في مكانه ويحميه ويعمل على توضع الليف ومراصفته لكي يمنع الخسارات التي نوقشت في الفقرة السابقة . ان الطوق هو بالأساس أنبوب اسطواني ذو ثقب صغير في أحد طرفيه من أجل الليف وثقب أكبر في الطرف الأخر من أجل غلاف الكابل . يبين الشكل (8 ـ 16) الفكرة الأساسية . في



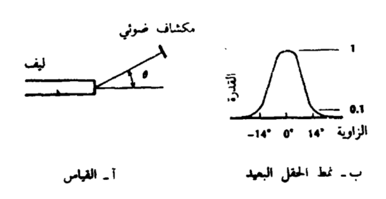
شكل (8 ـ 16) ـ ربط الليف مع الطوق .

التصميم الدقيق تقوم أداة ماسية موضوعة داخل أحد طرفي الطوق بوضع الليف في مكانه بدقة . عند هذه المرحلة من تحضير الطرف يبرز الليف من الطوق ويتم لصق الليف وغلافه مع الطوق بمادة الأيبوكسي فيتشكل بذلك وصلة دائمة ويبقى حول الليف البارز خرزة من الأيبوكسي . تربط عندئذٍ إلى الطوق أداة صقل غير ثابتة مصممة كي تحفظ الطوق بثبات خلال الصقل . فتوجه الليف أثناء حركته عبر ورق كاشط فيُحفظ الليفُ متعامداً مع سطح الشحذ المسطح . يشحذ الليف على التوالي بواسطة أوراق كاشطة أنعم فأنعم حتى الحصول على سطح ملمّع . يستعمل الماء من أجل انزلاق وتبريد الليف ولطرد الأجزاء

المتبقية . يجب شطف أداة الصقل والطوق والليف قبل الانتقال من عملية كشط إلى أخرى . يتم الصقل النهائي بمعجون تلميع ذي جزيئات معلقة ذات أقطار من 0.3 μm إلى 1 μm . بعد الحصول على سطح صقيل ترفع أداة التلميع من المجموعة . ويكون الطرف المسطح من الليف على مستوى سطح طرف الطوق ومتعامداً مع محور الليف فتكتمل بذلك طريقة الصقل والتلميع .

تحضر عادة ألياف السيليكا المكسوة بالبلاستيك والألياف المكونة كلياً من البلاستيك بواسطة التلميع وذلك لأن البلاستيك لا ينشق بشكل أملس مثل الزجاج . تزال أولاً الأغلفة الخارجية (الغلاف الواقي أو عضو الدعم) فتظهر قطعة قصيرة من ليف مكسوٍ . يثبت الليف وغطاء واقٍ داخل طوق أو بواسطة أداة تثبيت بديلة أو بواسطة ملزمة أو مثبت . يشحذ عندئذٍ الليف المثبت إلى الدرجة المرغوبة من النعومة بالطريقة الموصوفة سابقاً .

ان الأطراف الصقيلة مطلوبة من أجل عدة قياسات ليفية عامة . تظهر الحاجة إليها عندما نحدد تجريبياً فتحة النفوذ بواسطة قياس الانبعاث من الليف كما يبينه الشكل (8 ـ 17) . تنتج القياسات أنماطاً كتلك المبينة في الشكل . تتنبأ النظرية التي كنا قد استخدمناها قطعاً حاداً في نمط الحقل عند زاويةٍ تُطابق الزاوية الحرجة الداخلية . تهمل هذه النظرية الأشعة المنحرفة (الأشعة التي لا تمر في محور الليف إلا أنها لا تزال موجهة من قبل الليف) . ان زاوية القبول المحددة تجريبياً تعرف في بعض الأحيان بانها الزاوية التي عندها تنخفض القدرة



شكل (8 ـ 17) ـ تحديد فتحة النفوذ بواسطة قياس نمط إشعاع الحقل البعيد لليف .

المشَعَّة إلى 10٪ من قيمتها عند الذروة . من أجل القياس المبين في الشكل (8 ـ 17) تبلغ زاوية القبول 14° فينتج هذا فتحة نفوذ عددية مقيسة تساوي :

$$NA = \sin 14° = 0.24$$

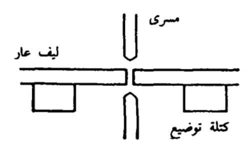
يتطلب قياس تخامد الليف وجه طرف صقيل أيضاً . يمكن إيجاد الخسارة بمقارنة القدرة الصادرة من ليف طويل مع القدرة الصادرة من نفس الليف عندما يُقصَّر . وتكون الخسارة لوحدة الطول هي بكل بساطة الخسارة المقيسة بالديسبيل مقسومة على طول الليف الذي أزيل من الكابل بين حالتي قياس القدرة .

(8 ـ 3) ـ الوصلات الدائمة Splices

إن هذه الوصلات هي على العموم وصلات ليفية دائمة (بينما يمكن للموصلات ان تُعشَّق وأن تفك بشكل متكرر وبسهولة) . تتضمن تقنيات التوصيل الدائم الأساسية صهر الليفين أو تقييدهما مع بعض في بنية تراصف . يمكن تجهيز القيد بواسطة مادة لاصقة أو بالضغط الميكانيكي أو بالاثنين معاً .

التوصيل الدائم بالصهر Fusion Splicing

تنتج وصلات الانصهار الدائمة بواسطة لحام زجاجين كما يبينه الشكل (8 ـ 18) . تستعمل الات الصهر التجارية القوس الكهربائي من أجل



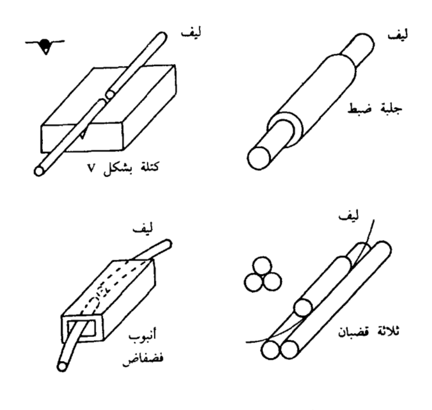
شكل (8 ـ 18) ـ الصهر بالقوس الكهربائي .

تنعيم أطراف الألياف . تحضر الأطراف بطريقة الخدش والقطع . ويتم التراصف وذلك بتعيير أدوات خاصة دقيقة متصلة بالألياف . يمكن فحص التراصف بالنظر بواسطة مجهر أو بواسطة بعض تجهيزات التكبير الأخرى . يمكن اختبار التراصف أيضاً بمراقبة قيمة القدرة التي تعبر الوصلة وذلك قبل أن يتم صهر الليفين . وخلال الصهر يعمل شد السطح على مراصفة محوري الليفين فينقص الانزياح الجانبي حتى الحد الأدنى . تبلغ خسارات الوصلات الدائمة التي تنتجها تجهيزات الصهر التجارية أقل من 0.25 dB . ويمكن ببعض الحرص الحصول على خسارات أقل من 0.1 dB . يمكن حماية منطقة الوصلة بتغطيتها بمواد مثل RTV و Epoxy وبأنبوب يتقلص بالحرارة . إن الصهر يعمل بشكل جيد في الألياف المكونة كلياً من الزجاج سواء كانت وحيدة الأسلوب أو متعددة الأساليب .

التوصيل الدائم باللصق Adhesive Splicing

لقد اقتُرح عدد من ترتيبات التراصف للوصلات الدائمة باستعمال التقييد اللاصق . يبين الشكل (8 ـ 19) بعضاً منها . إن كلًا من هذه البنى تراصف الألياف ميكانيكياً وتدعم الوصلة وتبقي الألياف في مكانها باستخدام الايبوكسي . وحيث انه يتوجب أن يعالج (يتصلب) الايبوكسي فانه لا يمكن استعمال هذه الوصلات الدائمة فوراً . يمكن إنقاص أزمان المعالجة بالتسخين أو بالتعرض للأشعة فوق البنفسجية بالنسبة لبعض أنواع الايبوكسي .

من المحتمل أن تكون الكتلة ذات الشكل (V) هي الوصلة الدائمة الميكانيكية الأبسط . توضع الألياف العارية المطلوب توصيلها في الأخدود . ان التراصف الزاوي على وجه الخصوص يضبط بشكل جيد . يمكن لليفين ان ينزلقا في الأخدود حتى يتلامسا ويتم بعدئذٍ تثبيتهما بمادة الايبوكسي بشكل دائم . لذلك تكون أخطاء الفصل بين الأطراف ذات قيمة دنيا . إذا كان دليلا الايبوكسي والليف متوائمين فيمكن قبول وجود ثغرات صغيرة وبخسارة قليلة. إن عدم التراصف الجانبي في الأخدود سيكون مهملاً إذا كان لليفين نفس أقطار النواة والكساء وتقع كل نواة في مركز كسائها . يمكن كشف النوى المنزاحة



شكل (8 ـ 19) ـ وصلات تناكبية .

بتدوير ليف الخرج أثناء مراقبة القدرة الصادرة . إن الألياف المتماثلة جيدة الصنع ستنتج قدرة الخرج ذاتها من أجل جميع التوجيهات . لا يمكن لأي من الوصلات الدائمة المبينة في الشكل (2 ـ 19) أن تعوض حالة النوى غير المركزية . بالنسبة للكتلة ذات الشكل (V) توضع صفيحة غطاء فوقها لحماية الوصلة .

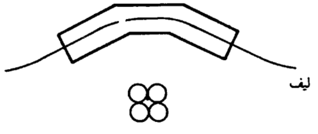
إن لجلبة الضبط المبينة في الشكل (8 ـ 19) ثقباً مركزياً يكفي فقط لإدخال الليف المكسو . يكون طرفا الجلبة مستدقين لكي يسمحان بدخول الليف بسهولة . يمكن تطبيق ايبوكسي مواءمة الدليل على طرفي الليف قبل الدخول في الجلبة . أو يمكن استعمال ثقب محفور في جانب الجلبة من أجل ملاحظة الليفين المتلامسين، وحقن الايبوكسي أو سائل مواءمة الدليل . يمكن ان تكون الجلب معدنية أو بلاستيكية. في إحدى تقنيات الوصل تكون مادة الجلبة

بلاستيكاً ليناً . عندما تدخل الألياف في ثقب ذي قطر أصغر قليلاً من قطرها فان المادة المرنة تجبر كلاً من الليفين على التراصف وفق محور مركزي مشترك . وحتى في حال ألياف ذات أقطار كساء غير متساوية سيتم تراصف محاورها جانبياً .

إن الوصلة ذات الأنبوب الفضفاض المبين في الشكل (8 ـ 19) تبدو مثيرة للاهتمام أيضاً . يدخل الليفان في الأنبوب المعلق بحرية . ويؤدي انحناء الليفين إلى دوران الأنبوب فيتم تراصفهما في إحدى الزوايا ويتم بعدئذٍ تثبيتهما بواسطة الايبوكسي .

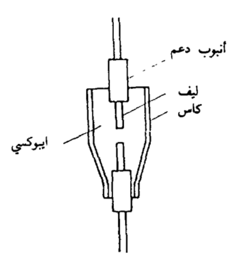
يمكن وضع ثلاثة قضبان ضبط معدنية أو زجاجية كما يبدو في الشكل (8 ـ 19) من أجل تراصف الليفين . يتم اختيار أقطار القضبان بحيث يكون الثقب المتشكل عند الوصلة كافياً فقط لدخول الليف . يطبق ايبوكسي مواءمة الدليل على الليفين ويدخل الليفان في الثقب حتى يتلامسا . يوضع على المجموعة جلبة قابلة للانكماش حرارياً . عندما تطبق الحرارة تقوم الجلبة بتثبيت القضبان وضغطها على الليف .

يبين الشكل (8 ـ 20) رسماً لوصلة لها علاقة بما وصف سابقاً . يتم صهر أربعة قضبان زجاجية مع بعضها فيتشكل أربعة أخاديد بشكل (V) . يكون الفراغ بين القضبان أكبر من الليف . تحنى نهايتا الحزمة بحيث ان الليف الداخل يدفع إلى أحد الأخاديد بشكل مشابه كثيراً جداً لطريقة الأنبوب الفضفاض . يمكن ان يملأ الدليل الزجاجي مسبقاً بايبوكسي موائم الدليل وقابل للمعالجة بالأشعة فوق البنفسجية . تدفع الألياف المحضرة في الفتحات الموسعة تدريجياً نحو الخارج حتى تتلامس . يعرّض الايبوكسي إلى إشعاع فوق بنفسجي من أجل تثبيت القيد .



شكل (8 ـ 20) ـ وصلة ذات قضيب مصهور محني .

يبين الشكل (8 ـ 21) تقنية توصيل لا تتضمن بنية آليّة من أجل تراصف الليفين. يدخل الليفان العاريان في أنبوب دعم زجاجي (أو معدني) بحيث يلائم الكساء بشكل مريح. يُسحب الأنبوب بعيداً عن رأس الليف بحيث يمكن تحضير الليف بواسطة الشق. ويقيد الليف حينئذٍ إلى الأنبوب تاركاً بضعة ميلليمترات من الليف بارزة. يتم تراصف الليفين بتحريك الأنبوبين المثبتين إلى أدوات ثلاثية الأبعاد. وتجرى مراقبة التراصف بواسطة مجهر. ويمكن أيضاً تحسين التّراصف بواسطة مراقبة القدرة الصادرة. يحيط بالوصلة كأس يشبه



شكل (8 ـ 21) ـ الوصلة ذات الكأس.

رأس قطارة العين كما يشير إليه الشكل. يملأ الايبوكسي الكأس لكي يثبت الاتصال. إذا قيست القدرة المرسلة أثناء التّراصف يمكن استعمال هذه الطريقة لنوى غير ستمركزة ولنوى غير متساوية وذلك لأن موضع كل ليف يتحدد بواسطة انتقال القدرة الأمثل.

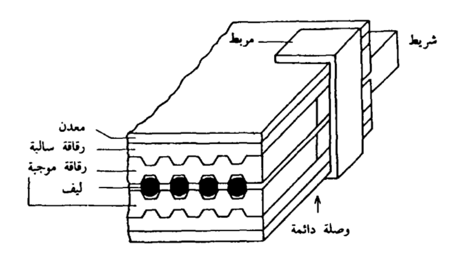
يجب ان يتضح من العينات التي عرضت بأنه يوجد العديد من تقنيات التوصيل الدائم. يمكن للمصممين أن يختاروا من مجموعة منوعة من الطرق التي قدمت أو يمكنهم استعمال براعتهم لتقديم طرق محسنة وجديدة.

تنتج الوصلات الدائمة الميكانيكية الجيدة خسارات من بضعة أعشار الديسيبل إلى ما دون 1 dB بقليل عندما توصل ألياف متماثلة. من أجل

الحصول على أقل خسارات يجب المحافظة على نهايتي الليف نظيفتين . من مقارنة كفاءة الوصلات الدائمة الفعلية مع خسارات عدم التراصف المعددة في الفقرة السابقة يتضح أن الوصلات الميكانيكية تقدم درجة عالية من التحديد الدقيق للموقع .

بعد ان تكون الألياف قد وصّلت يجب إعادة تغليف أي ليف عار قد تبقى (مثلاً بالتغليف بالايبوكسي أو اللاكر أو RTV) . يحمي التغليف الليف من التآكل الذي يؤدي إلى الكسر .

لقد ناقشنا الألياف الشريطية في الفقرة (5 ـ 8) . يمكن لهذه الألياف أن توصل بواسطة الترتيب المبين في الشكل (8 ـ 22) . تقاد الألياف العارية في أخاديد دقيقة تشكّل بواسطة حفر رقاقات السيليكون . تشكل أخاديد على جانبي هذه الرقاقات الموجبة وتغطي رقاقةٌ موجبةٌ أخرى الألياف . تقيد هذه البنية بشكل دائم وتلمّع الأطراف ويصنّع شريط ليفي ثانٍ بالطريقة ذاتها . يتم



شكل (8 ـ 22) ـ وصلة دائمة شريطية ـ منظر مقطعي .
يشير السهم إلى مكان تلاقي الألياف .

الحصول على الوصلة الدائمة ذاتها وذلك بوضع الرقاقات الموجبة على رقاقات سالبة كما يبدو على الشكل . تمتد الرقاقتان السالبتان على كل من الرقاقتين

الموجبتين فتعملان على تراصفهما . ويتم تثبيت الوصلة الدائمة كاملة بواسطة أطواق معدنية . ومع انه تدعى هذه في بعض الأحيان وصلة دائمة فان هذه البنية يمكن توصيلها وفصلها بشكل متكرر بقليل من الصعوبة . ميزة هذه التقنية انه يمكن توصيل الألياف بموصلات في المصنع وتنفيذ التوصيل الدائم فيما بعد في الحقل . يمكن تكديس الرقاقات الموجبة لإنتاج موصل طبقي من أجل ربط كل شريط في كابل متعدد الأشرطة .

(8 ـ 4) ـ الموصلات Connectors

إن الأربطة التي يمكن إعادة تعشيقها كانت اختباراً لبراعة مصممي الموصّل ولإمكانات مستعملي الليف . ان التفاوتات المسموح بها الميكانيكية المتشددة المطلوبة من أجل اقتران فعال قد جعلت الموصلات عالية الجودة صعبة التصميم ومكلفة الإنشاء . تتضمن المتطلبات من أجل موصل جيد ما يلي :

1 ـ الخسارة الضئيلة :

يجب أن تضمن مجموعة الموصل حداً أدنى من عدم التراصف بشكل آلي وذلك عندما تعشّق الموصلات . وليس كما هو الحال في بعض ترتيبات التوصيل الدائم حيث لا يمكن مشاهدة الوصلة ضمن الموصل ولا يمكن اجراء تصحيح للموقع . إن نظاماً يضم عدة موصلات يجب أن يحتوي موصلات فعالة فمثلاً إذا استعمل خمسة موصلات وكانت خسارة كل منها 2 dB فتكون الخسارة الإجمالية 10 dB ويؤدي ذلك إلى انخفاض القدرة المسلمة إلى المستقبل بعامل مقداره 10 .

2 ـ التكرارية :

يجب الا تتغير كثيراً كفاءة الاقتران بتكرار التعشيق .

3 ـ التنبؤية :

يجب الحصول على نفس الكفاءة إذا استعملت نفس المجموعات من الموصلات والألياف بمعنى ان الخسارة يجب ألا تتأثر نسبياً بمهارة العامل المجمّع .

4 ـ الحياة الطويلة :

يجد ألا يُدنّي التعشيقُ المتكررُ كفاءةَ أو قوة الاتصال . يجب الا تتغير مع الزمن خسارة موصل معشّق .

5 ـ القوة الكبيرة :

يجب ألا يتدنى التوصيل نتيجة القوى المؤثرة على جسم الموصل أو الشد على كابلات الليف .

6 ـ الانسجام مع المحيط :

يجب ان يتحمل الاتصال تغيرات كبيرة في درجة الحرارة والرطوبة والمؤثرات الكيميائية والأوساح والضغوط العالية والاهتزازات .

7 ـ سهولة التجميع :

يجب ألا يكون تحضير الليف وربطه مع الطوق صعباً أو مبدداً للوقت .

8 ـ سهولة الاستعمال :

يجب ان يكون تعشيق الاتصال أو فكه سهلاً .

9 ـ الاقتصادية :

ان الموصلات المتقنة غالية جداً . أما الموصلات الأرخص وهي بلاستيكية عادة يمكن ألا تفي بالغرض تماماً .

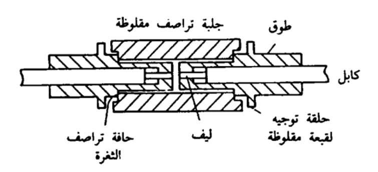
تتراوح خسارات الموصل النموذجية من 0.5 dB إلى 3 dB وهذا أكبر بكثير من خسارات الوصلة الدائمة . يمكن لسائل المواءمة أن يحسن الكفاءة إلا انه غالباً غير مقبول بسبب عدم ملاءمته وبسبب التبخر والتسرب من مكان الاتصال ونقصان الشفافية مع الزمن وبسبب ميل الوصلة إلى التقاط جزئيات صغيرة من مواد غريبة . إن الموصلات البلاستيكية المسكوبة ذات أسعار أقل ودقة ميكانيكية أقل (وبالتالي ذات خسارات أعلى) من الموصلات المعدنية .

لماذا ليس للموصلات خسارات ضعيفة بقدر خسارات الوصلات الدائمة ؟ يعود هذا لسبب واحد هو أن طرفي الليف لا يتماسان في معظم التصاميم . إن الموصلات التي تربط ببعضها لولبياً ستحتوي على ثغرة . وإن الإفراط في توثيقها قد يؤدي إلى تلفّ السطوح الصقيلة نتيجة ضغطها على

بعضها البضع بقوة كافية . أما في الوصلات الدائمة يمكن ان تحرك الألياف نحو بعضها البعض باعتدال إلى ان تتلامس . حتى انه يمكن لموقع الوصلة ان يكون مرئياً مباشرة وهكذا يمكن فحص التراصف .

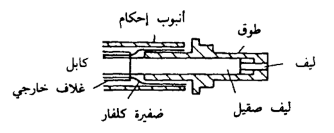
تصمم معظم الموصلات لتنتج وصلة تناكبية وذلك بوضع طرفي الليفين أقرب ما يمكن إلى بعضهما البعض . تتض ں تصاميم الوصلة التناكبية الجلبة المستقيمة والجلبة المستدقة والموصلات التراكبية . ان الموصل العدسي هو بديل عن تشكيلة الوصلة التناكبية . ان مجموعات أجزاء الموصل التي ستوصف في بقية هذه الفقرة يقصد منها شرح الطرق العامة الناجمة في توصيل الألياف . لا تعطي الأوصاف تفاصيل كاملة للموصلات التجارية الخاصة بل تتضمن مظاهر موجودة في العديد منها .

تتألف عموماً الموصلات التناكبية من طوق لأجل كل ليف ومن جلبة ضبط يركب فيها الليف . يبين الشكل (8 ـ 23) فكرة الجلبة المستقيمة . تصمم بعض الأطواق المستقيمة مثل الموصلات المحورية SMA . يتم الحصول على تراصف زاوي ومحوري من التكيف السلس للأطواق في الجلبة الأنبوبية . من الواضح ان الأمر يتطلب تفاوتات مسموحة دقيقة . يحدد الفصل بين طرفي الليف بواسطة طول الطوق بعد حافة تراصف الثغرة وبطول الجلبة . تركب قبعات مقلوظة على حلقة دليل وتلولب على الجلبة فتثبت التوصيل .



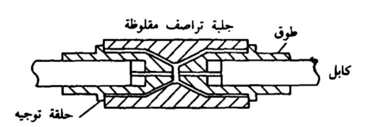
شكل (8 ـ 23) ـ موصل ذو جلبة مستقيمة .

يمكن للكابل في الشكل (8 ـ 23) أن يثبت إلى الطوق بواسطة الايبوكسي أو ان يحصر إليه أو بالطريقتين معاً من أجل تحقيق المتانة . هناك تصميم بديل يسمح لضفيرة كلفار أن تحصر إلى الطوق . كما يبينه الشكل (8 ـ 24) من أجل تحقيق قوة إضافية . ينتقل الشد على الكابل إلى عضو الكلفار القوي وليس إلى الليف الضعيف فيؤدي هذا إلى تخليص الليف من الإجهاد .



شكل (8 ـ 24) ـ عضو تقوية بضفيرة 'كلفار Kelvar يمكن ان تحصر إلى الطوق .

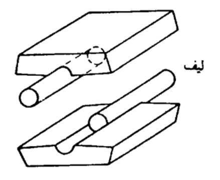
إن الموصلات ذات الجلبة المستدقة المبينة في الشكل (8 ـ 25) يمكن ان تتضمن أجزاء بلاستيكية مسكوبة . ان الجلبة المستدقة تقبل وتوجه أطواقاً مستدقة . يحدث اهتراء بالكشط قليل نتيجة التركيب والفك المتكررين للموصل المستدق . تثبت الكابلات إلى الأطواق بواسطة مواد لاصقة أو بواسطة الحصر بطريقة مشابهة لربط الكابل بالموصل ذي الجلبة المستقيمة . إن الفصل بين طرفي الليف يمكن ان يتحدد كلياً بواسطة البنية الميكانيكية كما في الشكل (8 ـ 25) حيث أن حلقةَ توجيهٍ تمنع الألياف من الانسحاب لمدى أقرب . إذا كانت حلقة



شكل (8 ـ 25) ـ موصل ذو جلبة مستدقة . تركب قبعات على الأطواق وتستقر مواجهة لحلقات التوجيه وتلولب على الجلبة المسننة لكي تثبت التوصيل .

التوجيه غير مقيدة بواسطة الجلبة (مثلاً إذا كان طول جلبة التراصف في الشكل 8 ـ 25 قصيراً جداً) فإن الثغرة ستعتمد على كمية الإحكام لقبعات التثبيت الملفوظة .

يبين الشكل (8 ـ 26) فكرة موصل متراكب وهو ذو بنية تشبه الوصلة الدائمة الأخدودية (V) . توضع الألياف الصقيلة في أخاديد مدوّرة في مقاطع مرآتية . يحتاج الأمر إلى أداة صقل ليس فقط من أجل مسك الليف أثناء تحضيره لكن من أجل ضبط طوله بدقة . يجري بعد ذلك تثبيت المقطعين المخددين

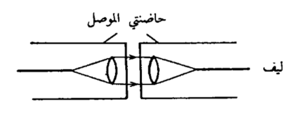


شكل (8 ـ 26) ـ موصل متراكب .

المصنوعين من البلاستيك اللّين مع بعضهما للحصول على الموصل . عند تطبيق ضغط فان المواد المرنة تتكيف مع شكل الليف . وهذا يؤدي إلى أن كلا الليفين يتراصفان وفق محور مركزي مشترك . وبهذه الطريقة يدعّم التراصف المحوري . أثناء تنفيذ ذلك يبقى نصفي الموصل بعيدين عن بعضهما (أحدهما فوق الآخر) إلى أن يتلاقى تقريباً طرفا الليفين . يضغط حينئذٍ المقطعان مع بعضهما ويثبتات بواسطة آليّة تثبيت . ويمكن فصل المثبت من أجل تحرير الموصل .

يبين الشكل (8 ـ 27) موصلاً عدسياً . يتم توازي الحزمة المنتشرة التي يشعها ليف مرسل وذلك بواسطة عدسة . تساوي المسافة بين الليف والعدسة والبعد البؤري كما هو مطلوب من أجل التوازي . (انظر الفصل 2 لمراجعة بصريات الشعاع) . يوجد ترتيب مماثل عند المستقبل . إن هٰذا الوضع هو نظام تصويري بتكبير يساوي الوحدة بغض النظر عن البعد بين العدستين . حيث ان

الحزمة تتسع عند مستوى التوصيل فإن الحساسية للانزياح الجانبي تنقص بالمقارنة مع الوصلة التناكبية . تنطبق الخسارات الجانبية المعطية بالمعادلة (8 ـ 1) والمبينة في الشكل (8 ـ 3) على قطر الحزمة الموسعة .



شكل (8 ـ 27) ـ موصل عدسي .

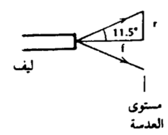
مثال :

ليف يبلغ قطر نواته 50 μm وفتحة نفوذه NA=0.2 . تتوسع حزمته إلى قطر 2 mm . صمم نظاماً عدسياً واحسب الانزياح الجانبي المسموح به من أجل خسارة مقدارها 0.5 dB .

الحل :

تتباعد الحزمة بزاوية : $\sin^{-1} NA = 11.5°$ كما يبينه الشكل (8 ـ 28) . يرتبط نصف قطر الحزمة بالمسافة بين الليف والعدسة بالعلاقة التالية : $r/f = \tan 11.5°$. نختار عدسة ذات بعد بؤري قيمته 4.9 mm وقطر أكبر بقليل من 2 mm توضع على بعد 4.9 mm من الليف . بوضع r=1 mm ينتج f=4.9 mm . بموجب الشكل (8 ـ 3) تحدث خسارة مقدارها 0.5 dB إذا كان d/2a=0.09 . حيث أن 2a=2 mm تكون عندئذٍ : $d=0.18\ mm = 180\ \mu m$. يجب مقارنة هذا التفاوت المسموح به بالنتيجة الواردة في المثال في الفقرة (8 ـ 1) حيث بلغ فيه التفاوت المسموح به 4.5 μm من أجل خسارة مقدارها 0.5 dB .

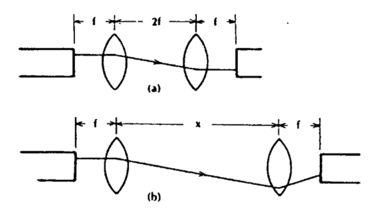
بالإضافة إلى الحساسية المنخفضة للانزياح الجانبي فإن الموصلات العدسية تسمح بثغرات أكبر من الوصلات التناكبية . وحيث ان الحزمة تصبح



شكل (8 ـ 28) ـ تصميم قارن عدسي .

متوازية فإن الثغرة يمكن ان تصبح كبيرة قبل ان تصبح الخسارات مهمة . يمكن ان تكون هذه الخاصية مفيدة حقاً ليس فقط انه يمكن ان يكون التفاوت المسموح به للفاصل فضفاضاً بل يمكن ان تغطي صفيحةً زجاجية مسطحة كل موصل فتحميه من المؤثرات المحيطية . لعلك اضطررت ان تعالج بعناية طرفي الليف في موصل المصقولين لدرجة عالية وعندما يكونان غير متصلين لتحفظهما من الخدش أو التلوث . وهذا هو واقع الحال حيث يمكن ان يشكل غطاءٌ زجاجي دائم جزءاً من موصل عدسي لكي ينقص احتمال حصول ضرر . إن البعد بين العدستين لا يمكن ان يكون كبيراً بشكل كيفي وذلك لأن الأشعة خارج المحور لا تدخل الليف المستقبل بنفس الزاوية التي تركت بها الليف المرسل ما لم يكن البعد بين العدستين مساوٍ إلى ضعفي البعد البؤري . يبين الشكل (8 ـ 29) التغير في اتجاه الشعاع من أجل ثغرة أكبر من 2 f . يتزايد الانحراف بحسب اتساع الثغرة . وبالطبع عندما يؤدي الانحراف إلى أن يتجاوز الشعاع زاوية قبول الليف فانه يفقد اقترانه مع الليف المستقبل .

إن للموصلات العدسية عدة مساوىء . تكون الخسارات أكثر حساسية لعدم التراصفات الزاويّة مما هي في الوصلات التناكبية . حيث انه ليس من الصعب الحصول على تراصف زاوي جيد فإن هذا الأمر ليس خطيراً جداً . ان تعقيد الموصلات العدسية يجعلها مكلفة وصعبة التجميع . وأخيراً بسبب الانعكاسات من العدستين ومن صفيحتي الغطاء (في حال وجودهما) يمكن ان تتجاوز الخسارات الثابتة للموصلات العدسية تلك الخاصة بالقوارن التناكبية .



شكل (8 ـ 29) ـ يتحدد البعد بين العدستين بالتغير في زوايا الاستقبال للأشعة خارج المحور . في (a) يبلغ البعد 2f وتُحفظ زوايا الشعاع المنبعث . وعندما يكون البعد أكبر من 2f كما في (b) تختلف زوايا الشعاع المنبعث والمستقبل . يمكن ان تقع زاوية الشعاع عند المستقبل الآن خارج مخروط قبول الليف فتسهم في عدم كفاءة القارن .

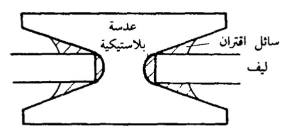
يمكن للأغلفة المضادة للانعكاس على السطوح المتاخمة ان تنقص من خسارات الانعكاس .

ان عدسة قضيب GRIN التي قدمت في الفقرة (2 ـ 2) يمكن ان تكون بديلاً لعدسة تقليدية في موصل كما يبينه الشكل (8 ـ 30) . يتألف كل مقطع موصل من ليف مربوط إلى عدسة GRIN صلبة ذات ربع خطوة . ان لهذا النوع من الموصلات نفس ميزة الموصل ذي العدسة الكروية : تفاوت مسموح به جيد لكل من الانزياح الجانبي والبعد بين الطرفين . ويمكن تغطيتها أيضاً بصفيحة زجاجية واقية لانقاص الضرر وتقليل الخسارات العائدة للخدوش والأوساخ إلى الحد الأدنى . ويمكن ان يكون تجميع هذا الموصل وصيانته أسهل مما هو للموصلات الكروية .



شكل (8 ـ 30) ـ موصل عدسي بقضيب GRIN .

يبين الشكل (8 ـ 31) موصلاً ذا عدسة مركبة من البلاستيك المسكوب موضوعة في وعاء . تشكل البنية المقعرة تجويفين مخروطيين يتم فيهما إدخال الليفين عند تعشيقهما . ويملأ التجويفان جزئياً بسائل اقتران . ان السائل ليس بسائل مواءمة الدليل بل هو جزء من نظام التصوير البصري . يساعد السائل في إبقاء الغبار خارج المسار البصري . ويبقى بشكل دائم في التجويف ملتصقاً بالعدسة البلاستيكية خلال التوتر السطحي .



شكل (8 ـ 31) ـ مبدأ الموصل العدسي المركب .

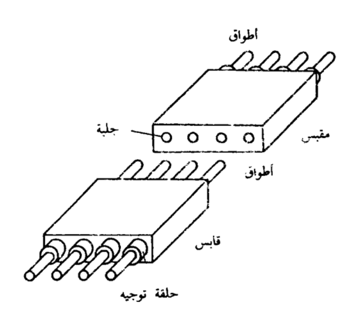
تحاط الألياف بمآخذ ذات رؤوس قابلة للانضغاط . وتربط بإحكام على مسافة قصيرة من وجوه أطرافها الصقيلة وهكذا يترك جزء من الليف حراً داخل المأخذ . عندما يثبت المأخذ على وعاء (يحتوي العدسة المركبة) يؤدي تطبيق ضغط على رأس المأخذ إلى تراجعه فيكشف طرف الليف . يدخل الليف الآن التجويف المخروطي فيوضّع نفسه كما في الشكل (8 ـ 31) . وعندما يفك المأخذ يمتد رأسه ليغطي الليف . من أجل حماية إضافية تغطى المآخذ غير المعشقة بقبعات .

كما هو بالنسبة للأنظمة العدسية الأخرى التي وصفناها تتمتع البنى العدسية المركبة بتفاوت انزياح جانبي مسموح به جيد . ان التجويف المخروطي مرفقاً بالضغط خلال التعشيق يؤدي إلى تحريك الليف المربوط بارتخاء نحو رأس النواة ويمس العدسة فيلغي أخطاء الفراغ .

يمكن إنشاء موصلات متعددة الأقنية . إن أبسط مثال لذلك هو موصل بقناتين وهذا يناسب الأنظمة المزدوجة حيث تحمل المعلومات في اتجاه واحد في أحد الليفين وفي الاتجاه المعاكس في الليف الثاني . يمكن ان يناسب التصميم

التراكبي (في الشكل 8 ـ 26) ليفين إذا احتوى مقاطعاً بأخدودين متوازيين اثنين وليس واحداً . يمكن ان تمتد فكرة التراكب إلى أكثر من قناتين إذا كان هناك أخاديد إضافية .

يمكن لموصلات متعددة الأقنية ان تستعمل الطرق ذات الجلبة المستدقة أو المستقيمة التي يمكن تسميتها بطراز الحربة . في أحد التصاميم الممكنة (انظر الشكل 8 ـ 32) يكون لكل ليف طوقه الخاص . توصل الأطواق في واحد من الكابلات متعددة الأقنية إلى قابس وتوصل أطواق الكابل الآخر إلى مقبس . تمتد أطراف أطواق القابس من جسم القابس ذاته بينما تختفي أطواق المقبس داخل جلبة في المقبس . عندما يتعشق القابس والمقبس توجه رأس الطوق الناتئة إلى وضع التراصف بواسطة الجلبة . تضغط الأطواق في القابس والمقبس بواسطة نوابض تدفعها على حلقات توجيه الطوق . يمكن تعديل طراز الحربة للقارن من أجل انتاج موصلات تقبل صفيفاً دائرياً من الألياف (بالأحرى غير خطي) .



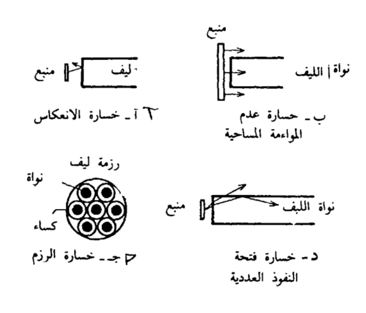
شكل (8 ـ 32) ـ موصل متعدد الأقنية .

(8 ـ 5) ـ اقتران المنبع Source Coupling

يمكن ان يكون الاقتران من المنبع الضوئي إلى الليف غير كفء بدرجة كبيرة . نعرّف كفاءة الاقتران بالعلاقة التالية :

$$\eta = \frac{P_f}{P_s} \qquad (10\text{-}8)$$

حيث P_f هي القدرة في الليف و P_s هي القدرة المنبعثة من المنبع . تكون خسارة الاقتران مقدرة بالديسيبل كما يلي : $L = -10 \log \eta$. تسهم عدة خسارات في عدم فعالية الاقتران وتشمل خسارة الانعكاس وخسارة عدم المواءمة المساحية وخسارة الرزم (تكسر الليف نتيجة الرزم) وخسارة فتحة النفوذ العددية . يبين الشكل (8 ـ 33) هذه المشكلات وتصفها الفقرات التالية :



شكل (8 ـ 33) ـ خسارات اقتران المنبع .

خسارة الانعكاس Reflection Loss

ان وجود ثغرة هوائية بين السطح الباعث والليف يسبب انعكاس القدرة عند السطح الفاصل وفقاً للمعادلة (3 ـ 28) من أجل ورود عمودي .
ان المعادلة ملائمة من أجل زوايا القبول الصغيرة الموجودة عادة . لقد حسبت الخسارة عند السطح هواء ـ زجاج (من هواء إلى زجاج) في الفقرة (3 ـ 5) وكانت دون 0.2 dB بقليل . إذا كان المنبع على تماس مع الليف أو إذا كان هناك وسائل مواءمة يملأ الثغرة فإن هذه الخسارة تختفي . ان خسارة مقدارها 0.2 dB صغيرة للغاية لدرجة أنه لا ينصح باستعمال سائل مواءمة إلا إذا كان ذلك لدعم بنية الليف . يحضّر وجه طرف الليف كما لو كان من أجل وصلة دائمة وذلك لمنع الانتثار من السطوح غير المستوية .

خسارة عدم المواءمة المساحية Area-Mismatch Loss

إذا كانت مساحة المنبع أكبر من مساحة نواة الليف فانه يفقد بعض من القدرة (انظر الشكل 6 ـ 33) . ان النقص في الكفاءة هو نسبة مساحة نواة الليف إلى مساحة المنبع Ac/As . وإذا كان المنبع أصغر من النواة فإن الخسارة تزول .

خسارة الرزم Packing-Fraction Loss

تستعمل في بعض الأحيان رزمة من الألياف كالمبينة في الشكل (8 ـ 33) بباعث وحيد . ترزم عدة ألياف معاً بحيث تتلامس أغلفتها . إن لهذه البنية عدة تطبيقات . يمكن لحزمة كبيرة ان تتواءم مع منبع ذي مساحة كبيرة فتزول خسارة عدم المواءمة المساحية . حيث ان المنابع الكبيرة يمكن ان تصدر ضوءاً أكثر من المنابع الصغيرة فيمكن قرن قدرة أكثر بالحزمة مما هو بالنسبة لليف مفرد تؤمن الحزم أيضاً الفيضية (زيادة عن الحاجة) بمعنى ان الاستقبال لا يتوقف إذا انقطع أحد الألياف مع ان سوية القدرة تنقص . يمكن ان تستعمل الحزمة الليفية أيضاً لتوزيع المعلومات إلى عدة محطات بواسطة فصل الحزمة

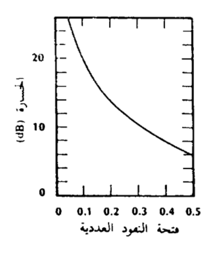
وتحويل الألياف المنفصلة إلى مسارات مختلفة . تتعرض الحزم الليفية لخسارة اقتران لم نذكرها بعد . إن ضوء المنبع الذي يصدم الكساء أو الفراغ الهوائي بين الألياف سيفقد . وان كفاءة الاقتران ستنقص بسبب كفاءة الرزم P_r التي تساوي نسبة مجموع مساحات النوى إلى مساحة الرزمة . إن قيم كفاءات رزم من 0.4 إلى 0.75 هي قيم نموذجية . يمكن الحصول على كفاءات رزم كبيرة وذلك بإنقاص ثخانة الكساء . ان إمكانية حصول تداخل معلومات بين الألياف رقيقة الكساء ليس مهماً وذلك لأن كل ليف يحمل المعلومات ذاتها .

خسارة فتحة النفوذ العددية Numerical-Aperture Loss

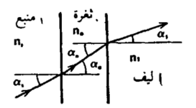
ان الضوء الذي يصدم النواة خارج زاوية قبول الليف لا يتم إرساله كلياً . تعطى كفاءة هذه الظاهرة بالعلاقة التالية :

$$\eta = N\ A^2 \qquad (11\text{-}8)$$

وذلك لليف ذي دليل درجي SI مثار بواسطة منبع لامبرتياني كثنائي LED باعث سطحي . لقد تمت مناقشة توزع القدرة اللامبرتياني في الفقرة (6 ـ 2) وقدّم له رسم بياني في الشكل (6 ـ 10) . تعطى فتحة النفوذ العددية لليف SI



شكل (8 ـ 34) ـ خسارة الاقتران من منبع لامبرتياني إلى ليف SI .



شكل (8 ـ 35) ـ تقدم الشعاع من المنبع إلى الليف . وفقاً لقانون Snell :

$$n_s \sin \alpha_s = n_0 \sin \alpha_0 = n_1 \sin \alpha_1$$

تعتمد زاوية الشعاع داخل الليف (α_1) فقط على اتجاه الشعاع الأصلي ضمن المنبع (α_s) .

بالعلاقة : $NA=\sqrt{(n_1^2-n_2^2)}$ كما حددت في الفقرة (4 ـ 4) . تنطبق المعادلة (8 ـ 11) التي رسمت بيانياً في الشكل (8 ـ 34) عندما تفصل ثغرة هوائية (أو سائل مواءمة) المنبع عن الليف أو عندما يكون الاثنان على تماس مباشر مع بعضهما . ان هذا ينتج من علمنا أن العلاقة بين زاوية الشعاع في الليف واتجاه الشعاع المطابق داخل المنبع لا تعتمد على المادة التي بينهما . يبين الشكل هذه الخلاصة .

مثال :

احسب خسارات الاقتران لألياف SI ذات الخواص الواردة في الجدول (5 ـ 1) عندما تثار بثنائي LED باعث سطحي .

الحل :

بافتراض وجود تواؤم سطحي تحسب خسارة فتحة النفوذ العددية (NA) من المعادلة (8 ـ 11) وخسارة الانعكاس من المعادلة (3 ـ 28) . تظهر النتائج مقدرة بالديسيبل في الجدول (8 ـ 1) . تهمل خسارة الانعكاس التي تنطبق فقط عندما توجد ثغرة هوائية بالمقارنة مع خسارات فتحة النفوذ العددية .

إن خسارات الاقتران لألياف ذات فتحات نفوذ عددية صغيرة تبلغ قيمة مهمة . ان ميزة الليف عالي النوعية منخفض الخسارة بالنسبة لليف ذي خسارات أكبر يمكن ألا تظهر إذا كان المسار قصيراً وإذا كانت NA أكبر من أجل الليف ذي الخسارة الكبيرة . سيوضح المثال التالي هذه النقطة :

مثال :

يشع منبع لامبرتياني (3 dB m) 2 mW . ما هو مقدار القدرة المقرونة إلى الألياف الزجاجية SI والألياف البلاستيكية الواردة في الجدول (5 ـ 2) ؟ ما هو مقدار القدرة المتبقية في الألياف بعد مسافة 10 m و 100 m ؟

الجدول (8 ـ 1) ـ خسارات الاقتران بين منبع لامبرتياني وليف SI

NA	خسارة NA dB	خسارة الانعكاس dB	الخسارة الكلية dB
0.24	12.4	0.2	12.6
0.41	7.7	0.2	7.9
0.53	5.5	0.2	5.7

الجدول (8 ـ 2) ـ إرسال القدرة لليف زجاجي وليف بلاستيكي كل منهما مثار بقدرة مقدارها 2 m W من LED لامبريتاني .

الليف	NA	التخامد dB	خسارة الاقتران dB	القدرة المقرونة dB m	قدرة الخرج 10 m dB m	قدرة الخرج 100 m dB m
زجاج	0.24	5	12.6	−9.6	−9.7	−10.1
بلاستيك	0.53	400	5.7	−2.7	−6.7	−42.7

الحل :

تعطى نتائج هذه المسألة في الجدول (8 ـ 2) . وتؤخذ بيانات التخامد و NA من الجدول (5 ـ 2) . ونجد خسارة الاقتران في الجدول (8 ـ 1) . تنخفض قدرة المنبع وهي (3 dB m) بمقدار 12.6 dB وهي خسارة اقتران الليف الزجاجي فتصبح 3−12.6=−9.6 dB m . وبالمثل يقرن الليف البلاستيكي مقدار 3−5.7=−2.7 dB m . إن القدرة في الليف البلاستيكي أكثر بمقدار 7 dB تقريباً مما هي في الليف الزجاجي . إن عشرة أمتار من الليف الزجاجي تسبب خسارة مقدارها 0.05 dB بينما يسبب نفس الطول من الليف البلاستيكي خسارة مقدارها 4 dB . وبإضافة هذه القيم إلى القدرة المقرونة ينتج مقدار −9.7 dB m و −6.7 dB m في الليفين الزجاجي والبلاستيكي على التوالي . من أجل مسار طوله 10 m يوجد قدرة أكثر بمقدار 3 dB في الليف البلاستيكي عالي الخسارة مما هو في الليف الزجاجي الأكثر فعالية . منْ أجل مسار طوله 100 m يخفض التخامد في الليف البلاستيكي (الذي يبلغ 40 dB على هذا الطول) القدرة إلى ما دون تلك التي في الليف الزجاجي بأكثر من 30 dB . تبلغ سوية القدرة عند

نهاية 100 m مقدار 97.7 μW في الليف الزجاجي (المطابقة إلى ‎-10.1 dBm) ومقدار 0.05 μW في الليف البلاستيكي (المطابقة إلى ‎-42.7 dB m) .

إن تقدير كفاءة الاقتران معقد لعدة عوامل . ان منبعاً متباعداً سيثير عادة أساليب كسائية . تنتشر هذه الأساليب مسافة قصيرة خلال الليف قبل ان تتخامد بشكل كبير . ان القدرة المقرونة مقيسة قرب نقطة المدخل ستحتوي هذه الأساليب بينما لا تكون كذلك القياسات البعيدة عن المدخل . حيث ان الأساليب الكسائية لم تؤخذ بعين الاعتبار عند الحصول على الكفاءة في المعادلة (8 ـ 11) فان تلك المعادلة تتنبأ بكفاءات أقل مما يحصل فعلياً للمسارات القصيرة . تنقص خسارة عدم المواءمة المساحية أيضاً للمسارات القصيرة إذا كانت أجزاء من المنبع تشع مباشرة إلى الكساء فتثير أساليب كسائية . هناك عامل آخر يحسن كفاءة اقتران المسافة القصيرة بالمقارنة مع كفاءة الليف الطويل هو وجود الأساليب التسربية التي تتصف بأشعة منحرفة . ان الأشعة المنحرفة لا تمر خلال محور الليف إنما تدور حوله بطريقة لولبية . تتخامد الأساليب التسربية إنما يمكن ان تقاوم لمسافات طويلة إلى حد ما في بعض الألياف .

رأينا في الفقرة (5 ـ 2) أن لألياف GRIN فتحات نفوذ عددية تتناقص من قيمة عظمى على طول المحور إلى قيمة الصفر عند حافة النواة . بسبب هذا يكون اقتران الضوء أقل وأقل فعالية أثناء تحرك نقطة الإثارة بعيداً عن المحور . لذلك يكون اقتران القدرة إلى ليف GRIN أقل كفاءة مما هو إلى ليف SI . تبلغ الكفاءة من أجل ليف ذي دليل بشكل قطع مكافىء ما يلي :

$$\eta = \frac{NA^2}{2} \qquad (12\text{-}8)$$

وذلك من أجل باعث لامبرتياني حيث تستعمل فتحة النفوذ المحورية . ان الاقتران مع ليف SI هو أفضل بمقدار 3 dB من الاقتران مع ليف ذي دليل على شكل قطع مكافىء مشابه .

تشع ثنائيات LED ذات الباعث الحافي والثنائيات الليزرية حزماً أكثر اكتنازاً من التوزيع اللامبرتياني فتحسن كفاءة الاقتران . يمكن ان يكون

التحسين من أجل ثنائيات LED عدة dB وأكثر من ذلك من أجل الثنائيات الليزرية . يمكن أن نضع نموذجاً لتوزع قدرة ضيّق بواسطة التعبير $\cos^m \Theta$ حيث m هو عدد صحيح و Θ هي زاوية الرؤية مقاسة بالنسبة إلى العمود على السطح الباعث . يبين الشكل (8 ـ 36) أنماط القدرة التي توضح كيف ان قيماً أعلى للعدد m تطابق حزماً أضيق .

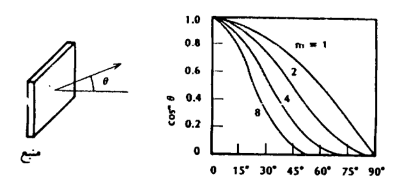
يمكن مقارنة أنماط القدرة المقيسة بمنحنيات مثل تلك المرسومة في الشكل من أجل تحديد قيمة m المناسبة من أجل منبع خاص . تعطى كفاءة اقتران SI بالعلاقة التالية :

$$\eta = 1 - (1 - NA^2)^{(m+1)/2} \qquad (13\text{-}8)$$

من أجل m=1 (التوزع اللامبرتياني) تنتهي هذه العلاقة مباشرة إلى المعادلة (8 ـ 11) . ومن أجل قيم صغيرة من NA تنتهي معادلة الكفاءة إلى :

$$\eta = \frac{(m+1)\, NA^2}{2} \qquad (14\text{-}8)$$

تناسب هذه النتيجة التقريبية كفاءات أقل من 0.2 (7 dB) . يبدو واضحاً من هذا التعبير التحسن في الكفاءة للحزم الضيقة (m>>1) . من أجل الاقتران بليف ذي دليل على شكل قطع مكافىء تقسم المعادلة (8 ـ 14) على 2 .



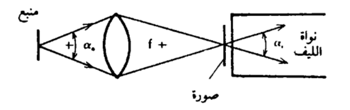
شكل (8 ـ 36) ـ نماذج توزع القدرة .

ان الاقتران بليف وحيد الأسلوب سيكون فعالاً جداً إذا كان للموجة الواردة توزع غوسي يتواءم مع التوزيع الغوسي للأسلوب HE_{11} المنتشر . وهذا يتطلب ان يكون حجما بقعتي الموجتين (المحددتين في الفقرة 2 ـ 5) لكل من الموجتين متساويين . يبين الشكل (2 ـ 27) مخطط الاقتران الممكن . تبأّر حزمة ليزرية غوسيّة حتى ينقص حجم البقعة ليساوي حجم الليف . سيوضع الليف عند المستوى البؤري (موقع خصر الحزمة) لتلقي الحزمة الواردة . ستبقى خسارة الانعكاس فقط إذا تواءمت حجوم البقع وكان التراصف تاماً . تحدث الخسارات بسبب الإزاحة الطولية للّيف بعيداً عن خصر الحزمة (إن هذا يكافىء خسارة الثغرة في الوصلة الدائمة) وبسبب عدم التراصف العرضي والزاوي لمحوري الحزمة الواردة والليف .

وكما لاحظنا عدة مرات ان السبب الرئيس لعدم كفاءة الاقتران في الألياف متعددة الأساليب هو التوزع الزاوي العريض للضوء من الباعثات الضوئية الشائعة وزوايا القبول المحدودة للألياف . ان الطريقة المعقولة لانقاص الامتداد الزاوي من المنبع هو استعمال عدسة كما يبينه الشكل (8 ـ 37) . ان التغير الزاوي كان قد أعطي بالمعادلة (2 ـ 9) . ان التقريب الزاوي الصغير الذي ورد في المعادلة (2 ـ 10) يبين ان الانتشار الزاوي يخفض بواسطة التكبير في نظام التصوير . يمكن ان تخفض قيم التكبير الضخمة تباعد الحزمة كثيراً ويرافق ذلك زيادة في كفاءة الاقتران . وحتى انه من الممكن انقاص تباعد الحزمة لدرجة ان كل أشعة المنبع تقريباً تقع ضمن زاوية القبول . بالطبع يجب ان تبقى الصورة المكبرة للمنبع أصغر من نواة الليف من أجل تجنب خسارة عدم التواؤم المساحي . من الواضح ان إنقاص امتداد الحزمة بواسطة تكبير المنبع سيفيد فقط عندما تكون النواة أكبر من المنبع . وعندما لا يكون هذا هو الحال يكون الاقتران التناكبي أكثر فعالية .

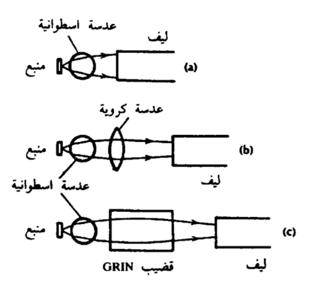
من أجل منبع ضخم ذي خسارات عدم تواؤم مساحي يمكن استعمال عدسة من أجل تخفيض مساحة المقطع العرضي للحزمة لمواءمة نواة الليف . يسبب التصغير $(M < 1)$ زيادة في تباعد الحزمة وفقاً للمعادلة (2 ـ 10) . ان هذه الطريقة ليست مناسبة من أجل الـ LEDs . يمكن أن

تكون مفيدة من أجل الاقتران من الليزرات (كالليزرات الغازية) التي لها تباعد حزمة صغير جداً .



شكل (8 ـ 37) ـ انقاص الامتداد الزاوي لمنبع .
حيث $\alpha_1 = \alpha_0/M$ هو M التكبير

تنتج الباعثات الحافية أنماط حزم غير متناظرة . ان استعمال عدسة اسطوانية موضوعة بحسب ما يبينه الشكل (a-38-8) تنقص حالة اللا تناظر بواسطة تضييق زوايا الشعاع فقط في المستوى ذي تباعد الحزمة الأكبر . ان العدسة الاسطوانية المرسومة كدائرة في الشكل هي غالباً وببساطة عبارة عن قطعة قصيرة من ليف زجاجي موضوعة على زاوية قائمة بالنسبة لليف المرسل .



شكل (8 ـ 38) ـ اقتران منبع يستعمل (a) عدسة اسطوانية و (b) مجموعة من عدسة اسطوانية وعدسة كروية و (c) مجموعة من عدسة اسطوانية وعدسة قضيب GRIN .

يمكن للحزمة المنبثقة من العدسة الاسطوانية ان تثير الليف مباشرة . تنقص العدسة الكروية أيضاً انتشار الحزمة إذا طلب ذلك كما يبينه الشكل (b-38-8) . يمكن أن تستبدل العدسة الكروية التقليدية بعدسة قضيب GRIN مكافىء كما يبينه الشكل (c-38-8) .

تتوفر غالباً منابع تجارية ذات ذيل ليفي قصير مربوط وجاهز من أجل التوصيل الدائم أو التوصيل غير الدائم إلى الليف المرسل . ان تفاصيل الاقتران بين المنبع والذيل يمكن الا تكون معروفة عند الشاري . يحتاج مصمم النظام ان يعرف فقط القدرة المنبثقة من الذيل وحجم النواة ذاته (SI أو GRIN) . عند شراء منبعٍ يجب على الشاري أن يفحص فيها إذا كانت قدرة الخرج المحددة من قبل المصنع هي القدرة الصادرة من الباعث مباشرة أو القدرة التي تنبثق من الليف المذنب . ان القدرة الأخيرة هي أصغر بكثير في معظم الحالات بسبب كفاءة الاقتران الصغيرة .

(8 ـ 6) ـ الخلاصة :

يتطلب إنتاج وصلات دائمة فعالة وموصلات وقوارن منبع مقداراً كبيراً من الحرص والانتباه . يجب تحضير أطراف الليف بدقة ويجب ان يكون التوضع والتراصف صحيحين تماماً. وباتخاذ الاحتياطات المناسبة يمكن الحصول على خسارات وصلة دائمة من فئة بضعة أعشار الـ dB أو أقل . تعطي الموصلات الجيدة خسارات أقل من 1 dB .

تعتمد كفاءة قوارن المنبع على نمط الاشعاع للمنبع وعلى فتحة النفوذ العددية NA لليف . تبلغ خسارات عناصر الـ LED الباعثة السطحية أكثر من 12 dB عندما تقرن إلى ألياف ذات NA < 0.24 . يمكن للعدسات ان تحسن الكفاءة عندما يكون الـ LED أصغر من نواة الليف . ان الثنائيات الليزرية وثنائيات الـ LED الباعثة الحافية التي تشع حزماً أضيق مما تفعله ثنائيات الـ LEd الباعثة السطحية ذات كفاءات اقتران أفضل . ان الخسارات لا تزال مهمة عند الاقتران بألياف صغيرة ذات NA صغيرة .

مسائل الفصل الثامن

8 ـ 1 ـ استنتج المعادلة (8 ـ 1) بواسطة حساب مساحة التراكب لنواتي الليف . وانجز التقويم بواسطة التكامل .

8 ـ 2 ـ استعمل المعادلة (8 ـ 1) لكي تثبت أربعة نقاط على الأقل على الشكل (8 ـ 3) .

8 ـ 3 ـ عند أي قيمة من الانزياح (التخالف) الجانبي الجزئي تكون خسارة ليف SI متعدد الأساليب مساوية لـ 10 dB .

8 ـ 4 ـ كرِّر المسألة (8 ـ 3) من أجل ليف وحيد الأسلوب وذلك بافتراض ان V=2.4 .

8 ـ 5 ـ يحتوي ليف وحيد الأسلوب حزمة ذات بقعة قطرها 5 μm . ما مقدار الإزاحة الجانبية التي تنتج خسارة مقدارها 0.5 dB وذلك بافتراض ان V=0.24 ؟

8 ـ 6ـ احسب الشدة المقيَّسة لحزمة عند السطح البيني نواة ـ كساء لليف SI وحيد الأسلوب إذا كان : V=2.4 وذلك بافتراض ان الحزمة المنتشرة غوسيَّة .

8 ـ 7 ـ ارسم بيانياً الخسارة مقدرة بالديسيبل مقابل عدم التراصف الزاوي لليف SI وحيد الأسلوب إذا كانت فتحة نفوذه العددية : NA=0.1 وكان الهواء يملأ الأخدود الذي يشكله الليفان وان زاوية عدم التراصف تتراوح بين $0°$ و $10°$.

8 ـ 8 ـ ارسم بيانياً الخسارة مقدرة بالديسيبل مقابل عدم التراصف الزاوي لليف وحيد الأسلوب ذي $n_1=1.47$ و $n_2=1.468$ و $V=2.4$. غيِّر الزاوية من $0°$ إلى $4°$ واجعل طول الموجة λ مساوياً إلى $0.8\ \mu m$ ومن ثم كرّر المسألة من أجل $\lambda=1.3\ \mu m$.

8 ـ 9 ـ استنتج المعادلة (8 ـ 4) من أجل الخسارة العائدة إلى عدم التراصف الزاوي .

8 ـ 10 ـ ارسم بيانياً حجم البقعة مقابل طول الموجة لليف SI ذي طول موجة قطع وحيد الأسلوب مساوٍ إلى 1250 nm وذي فتحة نفوذ عددية NA مساوية إلى 0.1 . ويتراوح طول الموجة بين 1000 nm و 1600 nm . احسب خسارة الإزاحة الجانبية أيضاً وارسمها بيانياً مقابل طول الموجة إذا كانت الإزاحة الجانبية تساوي $1\ \mu m$.

8 ـ 11 ـ ارسم بيانياً الخسارة بالديسيبل مقابل الفاصل بين الطرفين لليف وحيد الأسلوب الموصوف في المسألة (8 ـ 8) . دع طول الموجة يساوي $0.8\ \mu m$ و $1.3\ \mu m$ وغيِّر الفاصل من $0\ \mu m$ إلى $500\ \mu m$.

8 ـ 12 ـ لليف SI نواة قطرها $100\ \mu m$ و NA قيمتها 0.28 . صمِّم موصلاً عدسياً باتباع الاجراء الموصوف في الفقرة (8 ـ 4) علماً ان قطر العدسة 3 mm . احسب الإزاحة الجانبية المسموح بها من أجل خسارة مقدارها 0.8 dB .

8 ـ 13 ـ يثار ليف ذو نواة كبيرة SI متعددة الأساليب بواسطة LED ذي باعث سطحي . ان قيمة فتحة النفوذ العددية NA لليف هي 0.2 وقدرة خرج الـ LED هي 5 mW وخسارة الليف هي 4 dB/km . احسب القدرة في الليف عند 1 m و 1 km و 10 km . كرِّر هذه المسألة إذا كانت NA لليف تساوي 0.5 وخسارته هي 500 dB/km .

8 ـ 14 ـ استنتج المعادلة (8 ـ 14) من المعادلة (8 ـ 13) . (باستعمال الصيغة ثنائية الحد) . إذا سمح بخطأ مقداره ٪10 فالمطلوب تحديد قيمة NA التي تسمح باستعمال النتيجة التقريبية (المعادلة 8 ـ 14) . وقوِّم النتيجة من أجل قيم لـ m تساوي : 1 ، 2 ، 4 ، 6 ، 8 ، 10 ، 20 . احسب القيم الحقيقية والتقريبية لكفاءة الاقتران عند القيم العظمى لـ NA المحددة بالضبط .

8 ـ 15 ـ منبع ذي زاوية اشعاع عند منتصف القدرة مساوية لـ 40° مقيسة بين السطح الباعث والعمود عليه . احسب كفاءة الاقتران لليف SI متعدد الأساليب ذي فتحة نفوذ مقدارها 0.2 .

المراجع

الفصل الثامن

1. Haruhiko Tsuchiya, Hiroshi Nakagome, Nobuo Shimizu, and Seiji Ohara. "Double Eccentric Connectors for Optical Fibers." *Appl. Opt.* 16, no. 5 (May 1977): 1323-31.
2. Dietrich Marcuse, Detlef Gloge, and Enruque A. J. Marcatili. "Guiding properties of Fibers." *In Optical Fiber Telecommunications,* edited by Stewart E. Miller and Alan G. Chynoweth. New York: Academic Press, Inc., 1979, pp. 71-72.
3. Tsuchiya. "Double Eccentric Connectors for Optical Fibers." pp. 1324-25.
4. Marcuse. "Guiding Properties of Fibers." pp. 71-72.
5. Tsuchiya. "Double Eccentric Connectors for Optical Fibers." p. 1324.
6. Dietrich Marcuse. "Loss Analysis of Single-Mode Fiber Splices." *Bell Syst. Tech. J.* 56, no. 5 (May 1977): 703-18.
7. Tsuchiya. "Double Eccentric Connectors for Optical Fibers." p. 1326.
8. John Joseph Esposito. "Optical Connectors, Couplers, and Switches." In *Handbook of Fiber Optics: Theory and Applications,* edited by Helmut F. Wolf. New York: Garland Publishing, Inc., 1979. pp. 241-303.
9. Detlef Gloge, Allen H. Cherin, Calvin M. Miller, and Peter W. Smith. "Fiber Splicing." In *Optical Fiber Telecommunications,* edited by Sterwart E. Miller and Alan G. Chynoweth. New York: Academic Press, Inc., 1979. pp. 456-61.
10. Jack F. Dalgleish. "Splices, Connectors, and Power Couplers for Field and Office Use." *Proc. IEEE* 68, no. 10 (October 1980): 1226-32.
11. Gloge. "Fiber Splicing." pp. 461-82.
12. W. John Carlsen. "An Elastic-Tube Fiber Splice." *Laser Focus* 16, no. 4 (April 1980): 58-92.
13. Keigo Iizuka and Bernard Maillard. "Cheap, Easy Fiber Splicing for Labs." *Photonics Spectra* 16, no 3 (March 1982): 45-48.
14. T. Leslie Williford, Jr., Kenneth W. Jackson, and Christian Scholly. "Interconnection for Lightguide Fibers." *The Western Electric Engineer* XXIV, no. 1 (Winter 1980): 68-95.

15. Roy Hargrave. "A Lensed Fiber Connector." *Laser Focus* 16, no.10 (October 1980): 89-90.
16. Michael K. Barnoski. "Coupling Componnts for Optical Fiber Waveguides." In *Fundamentals of Optical Fiber Communications*. 2d ed., edited by Michael K. Barnoski. New York: Academic Press, Inc., 1981. pp. 147-86.
17. Ibid.
18. Ibid.

الفصل التاسع

نظم التوزيع

Distribution Systems

لقد قصرنا بحثنا حتى الآن على وصلات نقطة إلى نقطة وحيدة الاتجاه . غير ان الإمكانات العديدة لبصريات الليف تجعل تصميم أنظمة ثنائية الاتجاه (حيث ترسل الإشارات على ليف وحيد في الاتجاهين بآن واحد) ممكناً . ويعد توزيع المعلومات بوساطة الألياف على مطاريف متعددة مهماً وعملياً كذلك . إن للبنى متعددة النهايات تطبيقات عديدة وقد تكون شبكة المنطقة المحلية (Local Area Network, LAN) أهم هذه التطبيقات وهي توصيل تجهيزات دخل وخرج عديدة فيما بينها ضمن منطقة محددة مثل بناء وحيد أو تجمع يضم عدة أبنية .

تتضمن شبكة منطقة محلية (LAN) مكتبيةً مطاريف مزودة بأنابيب أشعة مهبطية موضوعة في أرجاء المنشأة . ويستطيع الموظفون الاتصال من أي مطراف بعدد من التجهيزات والخدمات المختلفة مثل ملفات معطيات الكترونية وحواسيب وطابعة الحاسوب وآلات النسخ ومعالج الكلمة أو خدمة النصوص الفيديوية . يمكن للحواسيب ذاتها أن ترتبط ببعضها بوساطة شبكة منطقة محلية ويمكن أن يشمل ذلك أيضاً تسهيلات للمؤتمرات الفيديوية

(Video Conferencing) . في شبكة LAN بصرية ليفية تحمل الألياف المعلومات بين الأجهزة المتصلة فيما بينها . وهي تتميز عن الأنواع السلكية بالأمن الأفضل والحجم الأصغر والوزن الأقل والنطاق الأعرض . وفي تطبيق آخر تسهم شبكات LAN المركبة في المصانع بمراقبة وتنظيم العمليات . يمكن ان نصنف ما يسمى المدينة المليّفة (الموصوفة في الفقرة 1 ـ 5) كشبكة منطقة محلية (LAN) موسّعة . إن الألياف مناسبة للاتصالات بين عدد من المواقع الميدانية في أنظمة قيادة تكتيكية . إن الوزن الخفيف للكابلات الليفية يسمح بالتركيب السريع للشبكة . وان أمن الاتصالات الليفية ميزة كبيرة في التطبيق متعدد المطاريف .

ندرس في هذا الفصل مكونات وتشكيلات نظام أساسي لتوزيع المعلومات بوساطة كابلات ليفية .

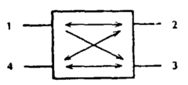
(9 ـ 1) ـ شبكات التوزيع Distribution Networks

يشكل القارن الاتجاهي الأساس لشبكات توزيع عديدة . يبين الشكل (9 ـ 1) قارناً اتجاهياً بأربعة بوابات . وسوف نصف فيها بعد قوارن ببوابات أكثر . تشير الأسهم المبينة في الشكل إلى اتجاهات تدفق القدرة المسموح لها . من أجل وصف خصائص القارن سنفترض ان القدرة P_1 واردة على البوابة 1 للقارن . ستقسّم هذه القدرة بين البوابتين 2 و 3 وفقاً لنسب الانشطار المرغوبة . ومثالياً لن تصل أية قدرة إلى البوابة 4 المعزولة . وعموماً يمكن ان نفترض ان القدرة التي تظهر من البوابة 2 (P_2) تساوي أو أكبر من القدرة التي تظهر من البوابة 3 (P_3) . لذا نعرّف الخسارات المميزة للقارن بالديسيبل كما يلي :

1 ـ خسارة التدفق (Throughput Loss)

$$L_{THP} = -10 \log (P_2/P_1) \qquad (1\text{-}9)$$

وهي تعين خسارة الارسال بين بوابة الدخل والبوابة المفضلة (P_2) .



شكل (9 ـ 1) ـ قارن اتجاهي بأربعة بوابات

2 ـ خسارة نقطة التفرع (Tap Loss)

$$L_{TAP} = -10 \log (P_3/P_1) \qquad (2\text{-}9)$$

وهي تعين خسارة الإرسال بين بوابة الدخل ونقطة التفرع (البوابة 3) .

3 ـ الاتجاهية (Directionality)

$$L_D = -10 \log (P_4/P_1) \qquad (3\text{-}9)$$

وهي تعين الخسارة بين بوابة الدخل والبوابة التي نرغب عزلها (البوابة 4) .

4 ـ الخسارة الزائدة (Excess Loss)

$$L_E = -10 \log \frac{P_2 + P_1}{P_1} \qquad (4\text{-}9)$$

وهي تعين القدرة المفقودة ضمن القارن . وتتضمن الاشعاع والانتثار والامتصاص والاقتران مع البوابة المعزولة .

في حالة القارن المثالي لن تصل أية قدرة إلى البوابة 4 $(L_D = \infty)$ وبالإضافة إلى ذلك فانه لن تفقد أية قدرة وهكذا تكون القدرة الصادرة من البوابتين 2 و 3 مساوية إلى قدرة الدخل أي $(P_1 = P_2 + P_3)$ مما يجعل الخسارة الزائدة تساوي صفراً . للقوارن ذات الاتجاهية الجيدة خسارات زائدة أقل من ديسيبل واحد واتجاهية أكبر من 40 dB .

إن نسبة الانشطار (P_2/P_3) هي نسبة القدرتين عند بوابتي الخرج . توصف القوارن غالباً بخسارة نقطة تفرعها . مثلاً يشير قارن 10 dB إلى قارن ذي خسارة نقطة تفرع مقدارها 10 dB . يعرض الجدول (9 ـ 1) قائمة بقيم خسارة التدفق وخسارة نقطة التفرع ونسبة الانشطار لعدة قوارن مثالية .

جدول (9 ـ 1) ـ خواص قوارن اتجاهية مثالية بأربعة بوابات

وصف القارن	L_{TAP} dB	L_{THP} dB	نسبة الانشطار
3 dB	3	3	1:1
6 dB	6	1.25	3:1
10 dB	10	0.46	9:1
12 dB	12	0.28	15:1

ومن أجل قارن بلا خسـارة أي: $P_2=P_1-P_3$ يمكن كتابة خسارة التدفق أي المعادلة (9 ـ 1) كما يلي :

$$L_{THP} = -10\log\left(1 - 10^{-L_{TAP/10}}\right) \qquad (5\text{-}9)$$

تعطي هذه النتيجة العلاقة بين خسارة نقطة التفرع وخسارة التدفق .

نوضح في المثال التالي كيف تغير الخسارة الزائدة خسارتي نقطه التفرع والتدفق

مثال :

لقارن خسارةٌ زائدةٌ مقدارها 1 dB ونسبة انشطار 1:1 . كم من قدرة الدخل يصل طرفي الخرج .

الحل :

بـاستعـمال $P_2=P_3$ و $L_E=1$ dB في المعـادلـة (9 ـ 4) ينتـج : $P_2/P_1=P_3/P_1=0.397$. وهذا يطابق خسارة تدفق مقدارها 4 dB وخسارة نقطة تفرع مقدارها 4 dB . إن هذه الخسارات تتجاوز خسارات قارن مثالي له نسبة الانشطار ذاتها (3 dB بحسب الجدول 9 ـ 1) بمقدار 1 dB وهي الخسارة الزائدة ذاتها .

إذا كان L'_{THP} و L'_{TAP} هما خسارتي قارن اتجاهي مثالي ذي نسبة انشطار محددة تكون عندئذ خسارتا قارن فعلي له نسبة الانشطار ذاتها وخسارة زائدة L_E كما يلي .

$$L_{THP} = L'_{THP} + L_E \qquad \text{(a-6-9)}$$

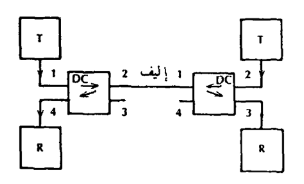
$$L_{TAP} = L'_{TAP} + L_E \qquad \text{(b-6-9)}$$

ان الخسارات تزداد بكل بساطة بمقدار الخسارة الزائدة .

وكما تشير الأسهم على الشكل (9 ـ 1) فان القارن ثنائي الاتجاه . ويمكن لأي من البوابات الأربعة ان تخدم كبوابة دخل . إن حالات الاقتران الممكنة (البوابة المفضلة تلي بوابة الدخل مباشرة) هي من 1 إلى 2 و 3 ومن 2 إلى 1 و 4 ومن 3 إلى 4 و 1 ومن 4 إلى 3 و 2 . تبنى القوارن الاتجاهية عادة بشكل متناظر وهكذا تكون الخسارات المميِّزة هي ذاتها بغض النظر عن أية بوابة يتم اختيارها كبوابة دخل .

الشبكة المزدوجة Duplexing Network

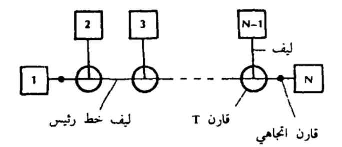
في النظام المباشر (الأقل تعقيداً) لإرسال الإشارات واستقبالها عند كل من طرفي الوصلة بين نقطة ونقطة يستعمل ليفان . يحمل الأول المعلومات في اتجاه والآخر يحمل المعلومات في الاتجاه المعاكس . أما النظام المزدوج الكامل (الذي يسمح بالإرسال في كلا الاتجاهين بآن واحد على نفس الليف) يحفظ الليف وهذه ميزة هامة خاصة في الوصلات الطويلة . يوضح الشكل (9 ـ 2) نظاماً مزدوجاً كاملاً بقارن اتجاهي عند كل نهاية . في هذا التطبيق ستقدم قوارن 3 dB مثالية خسارة بين المرسل والمستقبل مقدارها 6 dB . إن الخسارة الزائدة وخسارة الموصل عند كل بوابة ستنقص القدرة المستقبَلة أكثر من ذلك .



شكل (9 ـ 2) ـ نظام اتصالات مزدوج كامل . (T) المرسل و (R) المستقبل و (DC) القارن الاتجاهي . تظهر أيضاً البوابات غير المستعملة .

الشبكة T Tee Network

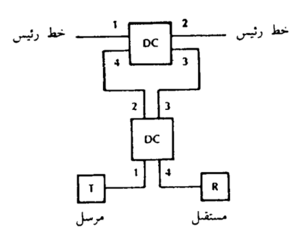
ان الشبكة T المرسومة في الشكل (9 ـ 3) تربط عدة مطاريف فيما بينها . يضم كل مطراف مرسلاً ومستقبلاً . ان الليف الرئيسي (Trunk Fiber) المعروف بخط المعطيات يحمل المعلومات بين نقاط التفرع التي تقدمها القوارن T. يسمح



شكل (9 ـ 3) ـ شبكة T تربط عدد N نهاية .

القارن T المبين في الشكل (9 ـ 4) بتدفق المعلومات في الاتجاهين عبر الليف الرئيسي . يبين الشكل قارنين اتجاهيين يؤلفان القارن T .

تتطلب شبكة ذات نهايات عديدة نسبة اقتران عالية (قدرة تدفق أكبر كثيراً من القدرة المتفرعة) لقوارن T . إن هذا يضمن ان الإشارات التي تصل أجهزة الاستقبال ستكون ذات قوة كافية لكي تُكْشَف بشكل مناسب . لنعتبر الخسارة



شكل (9 ـ 4) ـ قارن T يستعمل قارنين اتجاهيين .

الاجمالية بين النهايات 1 و N بافتراض ان القوارن الاتجاهية التي ترتبط بليف خط المعطيات الرئيس ذات خسارة تدفق L_{THP} وخسارة نقطة تفرع L_{TAP} . يجب ان تمر الإشارة خلال (N-1) قارن اتجاهي قبل الوصول إلى القارن عند المستقبل . يتصل المستقبل ببوابة تفرع هذا القارن وهكذا تبلغ خسارة التوزيع الاجمالية ما يلي :

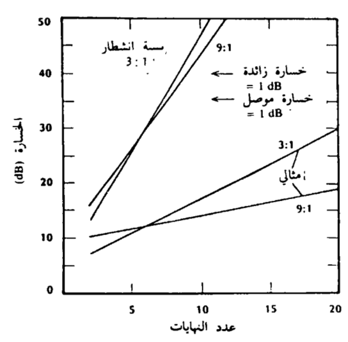
$$L = (N-1)\, L_{THP} + L_{TAP} \qquad (7\text{-}9)$$

نستنتج أن الخسارة الكلية مقدرة بالديسيبل تتزايد خطياً مع تزايد عدد النهايات .

وفي أي نظام فعلي نحتاج ان نأخذ بالحسبان الخسارات في الموصلات المستغملة في تجميع الشبكة . تتطلب كلٍ من بوابتي الدخل والخرج لكل قارن موصلاً . وهكذا يوجد عدد 2N موصلاً في المسارين بين النهايتين 1 و N . وتؤدي خسارة مقدارها L_C dB لكل موصل إلى إضافة خسارة مقدارها $2\,NL_C$ إلى المعادلة (9 ـ 7) فتصبح خسارة التوزيع الكلية ما يلي :

$$L = (N-1)\, L_{THP} + L_{TAP} + 2\, NL_C \qquad (8\text{-}9)$$

يبين الشكل (9 ـ 5) بضعة أمثلة عن خسارة التوزيع . ينطبق الجزء الأسفل من الشكل على القوارن المثالية (بلا خسارة زائدة ولا خسارة موصل) .



شكل (9 ـ 5) ـ خسارة التوزيع في شبكة T . يخص المنحنيان السفليان قارنين مثاليين . ومن أجل المنحنيين العلويين تبلغ الخسارة الزائدة 1 dB لكل قارن وخسارة الموصلات 1 dB .

تفترض المنحنيات العليا خسارة زائدة مقدارها 1 dB لكل قارن وخسارة مقدارها 1 dB لكل موصل . وكما يشير الشكل تصبح الخسارات كبيرة لدرجة تمنع توصيل نهايات عديدة .

إضافة إلى الخسارة تتمتع شبكات T بخصائص أخرى تستحق الذكر . وتشمل هذه الخصائص متطلبات خاصة في المستقبل وقابلية للعطب وسهولة إضافة نهايات جديدة . سنناقش بإيجاز هذه المواضيع في الفقرات التالية .

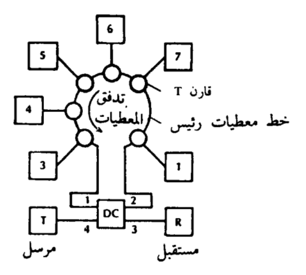
إن نهاية (مطرافاً) في شبكة T ستستقبل قدرة أكثر من نهاية مجاورة مما تستقبله من نهاية بعيدة . لذلك يجب ان يكون المستقبل قادراً على معالجة إشارات ذات مدى واسع من سويات القدرة . وبكلمات أخرى يجب ان يكون المستقبل ذا مدى ديناميكي واسع .

ان التعطل الموضعي في شبكة T لا يقطع كل الاتصالات . يؤدي قطع في ليف المعطيات الرئيس إلى تقسيم النظام إلى جزئين ويبقى تدفق المعلومات سليماً

على كل من جانبي القطع . ويؤدي تعطل أحد قوارن T إلى تقسيم النظام وإلغاء الاتصال مع النهاية المتفرعة . وان التعطل عند النهاية يفصل تلك النهاية ويترك بقية النظام في حالة عمل .

يمكن إضافة نهايات جديدة إلى شبكة T ببساطة وذلك بقطع الليف الرئيس وإدخال قارن T .

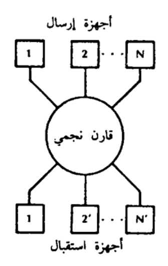
ظهر على الشكل (9 ـ 3) شبكة T خطية . ويبين الشكل (9 ـ 6) دارة حلقية تستعمل قوارن T . تُنقص الحلقة كمية الكابلات الضرورية في بعض تطبيقات شبكة منطقة محلية إلى الحد الأدنى . من أجل تدفق معلومات أحادي الاتجاه حول الدارة يمكن ان يكون كل قارن T قارناً اتجاهياً وحيداً بأربعة بوابات كما يوضحه الشكل . ومن أجل تدفق ثنائي الاتجاه يمكن ان يكون كل قارن T مثل المبين في الشكل (9 ـ 4) . ان تبديل القوارن في الشكل (9 ـ 6) بمراكز تكرار ينتج شبكة حلقية فعالة . ويمكن لأي نهاية ان تقرأ المعطيات المحولة إليها قبل ان تتجاوزها المعلومات .



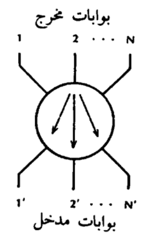
شكل (9 ـ 6) ـ شبكة حلقية أحادية الاتجاه . إن القارن الاتجاهي كالمبين على الرسم الذي يتصل بالنهاية 2 يربط كل محطة إلى الحلقة .

الشبكة النجمية Star Network

هناك بديل للشبكة T من أجل الشبكات متعددة النهايات وهو التشكيل النجمي المرسوم في الشكل (9 ـ 7) . في هذا المخطط يربط قارن نجمي مصدَّر N نهاية ويكون للقارن 2 N بوابة ويمكن ان ننظر إليه كقارن اتجاهي بأكثر من أربعة بوابات . يوزع القارن النجمي القدرة الواردة من أي من بوابات المرسل على بوابات المستقبل بالتساوي كما يبينه الشكل (9 ـ 8) . يقسّم قارن نجمي



شكل (9 ـ 7) ـ شبكة نجمية .



شكل (9 ـ 8) ـ قارن نجمي مصدَّر يوزع القدرة من أي بوابة دخل إلى جميع بوابات الخرج .

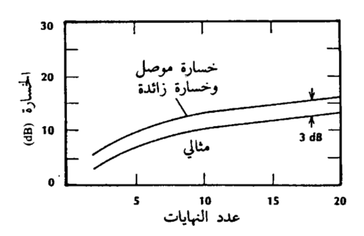
مثالي قدرةَ الدخل على N طريق بدون خسارة . وتبلغ كفاءة الإرسال حينئذٍ لكل بوابة 1/N وتبلغ خسارة الإدخال المطابقة بالديسيبل :

$$L_{IN} = -10 \log (1/N) \qquad (9\text{-}9)$$

وإذا أضفنا خسارتي الموصلين ($2 L_C$) والخسارة الزائدة النجمية (L_E) تكون خسارة التوزيع الكلية المرافقة ما يلي :

$$L = -10 \log (1/N) + L_E + 2 L_C \qquad (10\text{-}9)$$

يبين الشكل (9 ـ 9) المعادلتين الأخيرتين . يمكن ان نلاحظ الاختلافات بين خسارتي الشبكتين النجمية وذات الشكل T بمقارنة الشكلين (9 ـ 5) و (9 ـ 9) . وعلى العموم تقدم الشبكة النجمية كفاءة أفضل عند توصيل عدة نهايات فيما بينها . ويحدث هذا بسبب ان تغير الخسارة اللوغاريتمية للتشكيل النجمي يتزايد مع N بشكل أبطأ كثيراً مما يفعله التغير الخطي في حالة النظام T . فمن أجل كل نهاية جديدة مضافة إلى النظام T يجب ان تمر الإشارة خلال موصلين اثنين إضافيين . بينما في النظام النجمي لا تؤدي النهاية المضافة إلى زيادة عدد الموصلات التي يجب ان تمر خلالها الإشارة أثناء انتقالها من المرسل إلى المستقبل .



شكل (9 ـ 9) ـ خسارات التوزيع في شبكة نجمية .

مثال :

قارن الخسارة المضافة عندما تتزايد نهايات الشبكة من 10 إلى 11 نهاية في نظام T وفي نظام نجمي افترض نسبة انشطار تساوي 9:1 وخسارة زائدة مقدارها 1 dB لقارن T . استعمل موصلات ذات خسارة مقدارها 1 dB لكلا النظامين .

الحل :

إن الخسارة المضافة في نظام T هي خسارة التدفق لقارن اتجاهي واحد بالإضافة إلى خسارة الموصلين . يبين الجدول (9 ـ 1) والمعادلة (a-6-9) ان $L_{THP}=1.46$ dB لقارن ذي نسبة انشطار 9:1 وذي خسارة زائدة تساوي 1 dB . تبلغ الخسارة المضافة لنظام T حينئذ 1.46+2=3.46 dB . وبإضافة نهاية واحدة تنقص القدرة المستقبلة إلى أقل من نصف قيمتها السابقة . وفي النظام النجمي تتغير الخسارة من $-10 \log (1/10)=10$ dB إلى $-\log (1/11)=10.4$ dB فتكون الزيادة 0.4 dB فقط .

من أجل أنظمة ذات عدة نهايات فقط يمكن ان تكون خسارات النظام T مقبولة وخصوصاً إذا كانت خسارة الموصل L_C قد انقصت حتى الحد الأدنى وذلك بإجراء التوصيل الدائم لنهايات القارن إلى القناة الليفية الرئيسيه بعناية . ومن أجل عدد كبير من النهايات (أكثر من 10) تعيق خسارات النظام T التصميم العملي . لماذا نعتبر النظام T إذاً ؟ إن النظام T يوفر أليافاً . فعندما تكون النهايات متباعدة كثيراً الواحدة عن الأخرى على طول المسار الممتد فإن النظام T يستعمل ليفاً أقل بكثير من النظام النجمي (حيث يجب ان يمتد كابل مستقبل من القارن المركزي إلى كل نهاية) .

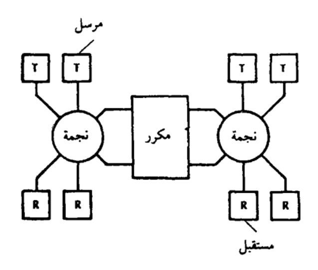
لتحقيق أكبر كفاءة يجب ان يكون للقارن النجمي في شبكة ذات N نهاية 2 N بوابة فقط . أي أن كل البوابات يجب ان تكون قيد الاستعمال . ان قارناً بأكثر من 2 N بوابة يُدخِل خسارة توزيع أكثر من الضروري . ولهذا السبب فإن إضافة نهايات جديدة إلى نظام قائم تتطلب قارناً نجمياً جديداً (قارناً ببوابات

أكثر) . في المثال السابق افترضنا ان القارن النجمي الجديد ليس له خسارة زائدة أكثر مما للقارن القديم . ان هذا الافتراض معقول في حال إضافة بوابتين فقط رغم ان الخسارة الزائدة للأجهزة العملية تزداد مع عدد البوابات . يمكن ان تتغير الخسارة الزائدة من حوالي 1dB لـ 16 بوابة (N=8) إلى 3 dB لـ 128 بوابة (N=46) .

في شبكة نجمية يؤدي تعطيل كابل فرعي يصل مطرافاً إلى قارن إلى قطع الخدمة عن تلك النهاية فقط . وعلى أي حال يؤدي عطب القارن النجمي ذاته إلى إنهاء تدفق المعلومات كلها .

أنظمة التوزيع الهجينة Hybrid Distribution Systems

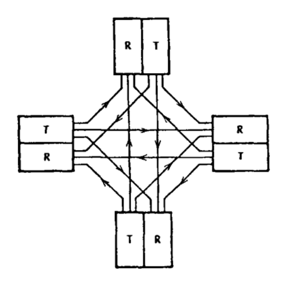
تقدم مجموعات من الشبكات المختلطة ، نجمية وعلى شكل T ، مرونة في تصميم أنظمة ليفية متعددة النهايات . في شبكة مختلطة (نجمة ـ T) يمكن للنجمة ان تربط وحدات متقاربة جداً ويمكن لشبكة T خطية ان توصل نهايات أكثر بعداً . ويمكن اجراء اتصال مباشر بين النجمة والـ T . في تصميم بديل يوضع مكرّر فعال من أجل دعم سويات الإشارة بين النجمة والـ T . وفي نظام (نجمة ـ نجمة) كالمبين في الشكل (9 ـ 10) يتضح استعمال المكرر .



شكل (9 ـ 10) ـ شبكة (نجمة ـ نجمة) .

الأنظمة متعددة الليف Multifiber Systems

يمكن تحقيق أنظمة ذات N نهاية وذلك بتوصيل كل مطراف إلى جميع المطاريف الأخرى مباشرة بالطريقة المقترحة في الشكل (9 ـ 11) . عند كل مرسل ينير منبع ضوئي وحيد حزمة ليفية تحتوي على (N-1) ليفاً . وللحصول على أعظم كفاءة تكون مساحة المنبع مساوية إلى مساحة الحزمة الليفية . وكل ليف يقود إلى واحد من أجهزة الاستقبال البعيدة . وعند المستقبل يصل ليف واحد من كل من المرسلات البعيدة . وتضيء الحزمة الليفية مكشافاً ضوئياً ذا سطح فعال مساوٍ ، على الأقل ، لسطح الحزمة .



شكل (9 ـ 11) ـ شبكة حزمة متعددة الألياف .

مع ان هذا التركيب يحتوي عدداً وافراً من الألياف فان له بعض الميزات .

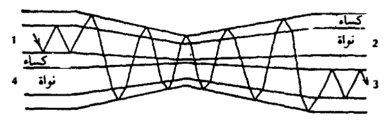
أولاً ـ يمكن استعمال بواعث ذات مساحة كبيرة (التي يمكن ان تقدم قدرة كلية أكثر مما تقدمه البواعث ذات المساحة الصغيرة المطلوبة لإثارة الألياف الصغيرة) . ثانياً ـ ان القدرة المرسلة في الليف لا تعاني تخميداً من الموصلات أو قوارن التوزيع كما في أنظمة الـ T أو الأنظمة النجمية . ستكون خسارة الارسال

أقل مما هي في أنظمة النجمة والـ T . ويمكن الغاء بعض الألياف إذا لم يكن الارسال مطلوباً بين كل مطراف والمطاريف الأخرى .

مع ان الشبكة متعددة الليف ليست متميزة خصوصاً فإنها لا تزال أكثر اقتصادية من تقديم وصلات مستقلة من نقطة إلى نقطة بين النهايات . ان هذا المخطط يتطلب عدد (N-1) مرسلاً وعدد (N-1) مستقبلاً عند كل نهاية من أجل عدد إجمالي N (N-1) مرسل و N (N-1) مستقبل . مثلاً يتطلب نظام من نقطة إلى نقطة ذو 4 نهايات 12 مرسلاً و 12 مستقبلاً . بينما تحتاج شبكة حزمة متعددة الليف إلى 4 مرسلات و 4 مستقبلات فقط .

(9 ـ 2) ـ القوارن الاتجاهية Directional Couplers

نصف في هذه الفقرة تصميم عدة قوارن اتجاهية بأربعة بوابات . ويستعمل كل من هذه القوارن مفهوماً مختلفاً لتحقيق الاقتران المرغوب . يبين الشكل (9 ـ 12) قارناً اتجاهياً مستدقاً ذا مخروطين مندمجاً قد صمم لتقديم قوارن منخفضة الخسارة وذات مدى من نسب الانشطار . ان التركيب بسيط جداً حيث يجدل ليفان من نوع وحيد الأسلوب أو متعدد الأساليب حول بعضهما ويخضعان لحالة شد . تسخن الوصلة فَيَلين الليفان وينصهر غلافاهما . يتشكل من سحب الليفين الطريين شكل مستدق ثنائي المخروط عند كل من البوابات الأربعة .

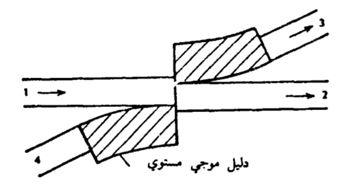


شكل (9 ـ 12) ـ قارن اتجاهي مستدق ثنائي المخروط مندمج .

يحدث الاقتران في الألياف متعددة الأساليب بسبب عدم صدم الأساليب ذات المرتبة الأعلى السطح المشترك بين النواة والكساء بعد الزاوية الحرجة في

المناطق المستدقة . وكما يوضح الشكل (9 ـ 12) فان هذه الاساليب تلتقط بواسطة الانعكاس الكلي عند السطح الخارجي للكساء وقد تحولت إلى أساليب كسائية . أما أشعة الأساليب ذات المرتبة الأدنى فانها لا تسير قرب الزاوية الحرجة ولن تتحول بسهولة . وتبقى القدرة المرافقة لهذه الأساليب في الليف الأصلي . حيث ان دليلي الموجة المندمجين المبينين في الشكل (9 ـ 12) يشتركان بنفس الكساء فان قدرة أساليب الدخل ذات المرتبة الأعلى تكون الآن مشتركة لكلا الليفين . يعيد المخرج المستدق الأساليب الكسائية إلى أمواج موجّهة بواسطة النواة . تعتمد نسبة الانشطار على طول الجزء المستدق وعلى ثخانة الكساء .

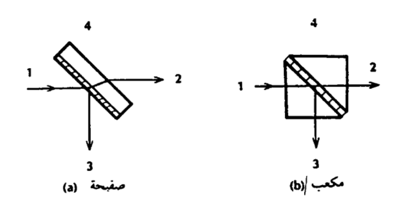
يمكن استعمال وصلة تناكبية منزاحة (Offset Butt Joint) لتشكل قارناً اتجاهياً ذا أربعة بوابات كما هو مبين في الشكل (9 ـ 13) . إذا كان الدخل في البوابة رقم 1 فان البوابة المفضلة (البوابة 2 في الشكل) تجمع كمية من القدرة تتحدد بمقدار الانزياح لألياف SI . يسير جزء من الضوء الوارد من الوصلة إلى نقطة التفرع (البوابة 3) على طول دليل موجي بلاستيكي على شكل مستوي مقوس . يمكن انتاج الدليل الموجي وأخاديد تحديد موضع الألياف بشكل دقيق بمعالجة غشاء ثخين بطريقة الطباعة بالتصوير الضوئي (Photolithography) .



شكل (9 ـ 13) ـ قارن اتجاهي ذو وصلة تناكبية منزاحة . تقرن القدرة بين ألياف القناة الرئيسة (1 و 2) وألياف نقطة التفرع (3 و 4) بواسطة أدلة موجية عازلة مستوية . يمكن تقدير خسارة الاقتران المنزاح الناتج عن عدم التراصف الجانبي بالرجوع للشكل (8 ـ 3) .

يعمل شاطر الحزمة (وهو عاكس جزئي) في الأنظمة البصرية التقليدية كقارن اتجاهيَ بسيط . تتألف صفيحة شطر الحزمة المبينة في الشكل (9-14-a) من طبقة رقيقة عاكسة جزئياً (إما عازلة أو معدنية) موضوعة على طبقة تحتية شفافة .

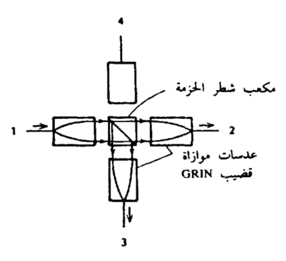
ان ثخانة وتركيب الغلاف يحددان نسبة الانشطار . تعمل صفيحة شطر الحزمة على إزاحة الحزمة الضوئية المرسلة جانبياً بالنسبة للحزمة الواردة . أما مكعب شطر الحزمة المبين في الشكل (9-14-b) فيزيل هذه الإزاحة . يتألف المكعب من هرمين منفصلين بغلاف عاكس جزئياً .



شكل (9 ـ 14) ـ قوارن اتجاهية شاطرة للحزمة . (a) ـ صفيحة شطر الحزمة و (b) ـ مكعب شطر الحزمة .

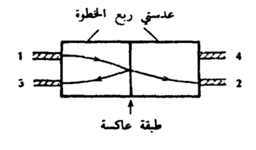
لا يمكن ان يستعمل شاطر الحزمة بنفسه عند تقسيم القدرة بين الألياف. ان الحيز الذي يشغله الشاطر هو بمثابة ثغرة . وكما تمت مناقشته في الفقرة (8 ـ 1) فان الثغرات بين ألياف التوصيل تنتج خسارات كبيرة بسبب ان الأشعة المتباعدة المنبعثة من ألياف الدخل لا تصيب الليف المستقبل . ان توازي الأشعة الواردة على شاطر الحزمة وإعادة تبئير (تركيز) الضوء المنقسم على ألياف الاستقبال يحل هذه المشكلة . يبين الشكل (9 ـ 15) قارناً اتجاهياً من نوع شاطر الحزمة يستعمل محدسات قضيبية GRIN من أجل التوازي وإعادة التبئير . يراصف مكعب شطر الحزمة البوابتين 1 و 2 (والبوابتين 3 و 4) . ان هذه

البوابات ستنزاح إذا كانت قد استعملت صفيحة شطر الحزمة . وان القارن في الشكل (9 ـ 15) سيعمل أيضاً في حال استبدال عدسات GRIN بعدسات كروية تقليدية .



شكل (9 ـ 15) ـ قارن اتجاهي يستعمل أربعة عدسات توازي قضيبيّة GRIN .

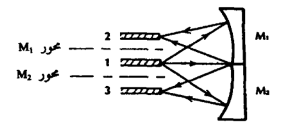
يبين الشكل (9 ـ 16) شكلاً آخر لقارن شاطر الحزمة . يتألف القارن من عدستي ربع الخطوة من قضيب GRIN يفصل بينهما غشاء عاكس جزئياً . يكون ليفا التوصيل منزاحين عن محوري العدستين . لتكن البوابة 1 مدخلاً فتنقل العدستان المجمِّعتان الضوء من البوابة 1 إلى الليف في البوابة 2 أما الضوء



شكل (9 ـ 16) ـ قارن اتجاهي .

المنعكس من الغشاء فانه يرتسم على البوابة 3 ولا يصل أي جزء من الضوء إلى البوابة 4 . وتتوزع المداخل عند البوابات الأخرى بطريقة مشابهة .

ان القوارن شاطرة الحزمة هي أجهزة تقسيم الاتساع . فهي توزع الضوء بتقسيم اتساع الموجة الواردة إلى النسب المرغوبة . ويمكن انتاج القوارن أيضاً بتقسيم جبهة الموجة حيث تقسم جبهة الموجة إلى عدة أقسام وتوجّه الموجات المنفصلة إلى البوابات المرغوبة. يوضح الشكل (9 ـ 17) قارناً يعمل وفق هذا المبدأ . يتباعد ضوء الدخل الصادر من البوابة 1 فيرتسم النصف الأعلى من الموجة على الليف وعند البوابة 2 بواسطة عاكس مقعر M1 . ويرتسم النصف الأسفل من الموجة على الليف عند البوابة 3 بواسطة عاكس مقعر M2 . وكما هو مرسوم فان نسبة الانشطار هي 1:1 . ويمكن الحصول على نسب أخرى بتكبير أحد العاكسين بحيث يعترض جبهات موجة أكثر من العاكس الآخر .

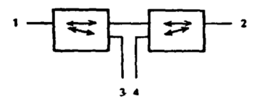


شكل (9 ـ 17) ـ قارن اتجاهي مقسم جبهة الموجة .

توضع الألياف في الشكل (9 ـ 17) خارج المحور وقرب مركز التقوس لكل عاكس . ان البعد البؤري للعاكس الكروي f يساوي نصف قطر التقوس وهكذا تكون الألياف على مسافة 2 f من المرآة شبه العدسيّة . ووفقاً لمعادلتي تكوُّن الصورة (المعادلتان 2 ـ 5 و 2 ـ 6) فان هذا التوضع ينتج صورة مبؤرة بتكبير يساوي الواحد . يؤمن تكوُّن الصورة بنسبة 1:1 عدم تباعد الحزمة وبالتالي قبول كل الضوء الوارد على ليف الخرج .

ان دخلا عند البوابة 2 لجهاز تقسيم جبهة الموجة يقترن إلى البوابة 1 فقط . وبالمثل يقترن دخل عند البوابة 3 إلى البوابة 1 فقط . ان للقارن في

الشكل (9 ـ 17) ثلاثة بوابات فقط . ان نظاماً مزدوجاً (انظر الشكل 9 ـ 2) يتطلب فقط قوارن بثلاثة بوابات . وبتوصيل قارنين بثلاثة بوابات كما في الشكل (9 ـ 18) ينتج قارن اتجاهي بأربعة بوابات .



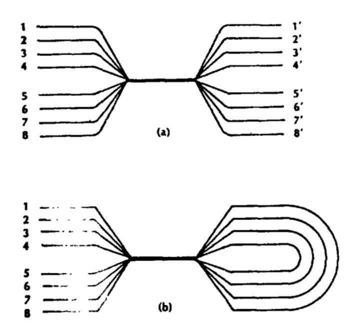
شكل (9 ـ 18) ـ بتوصيل قارنين بثلاثة بوابات نحصل على قارن اتجاهي بأربعة بوابات .

لقد أظهر الشكل (9 ـ 4) كيف ان قارنين اتجاهيين بأربعة بوابات يمكن ضمهما للحصول على قارن T من إجل إرسال ثنائي الاتجاه على قناة رئيسة ليفية واحدة . يمكن ان تستعمل أي من القوارن ذات البوابات الأربعة الموصوفة في هذه الفقرة لهذا الغرض .

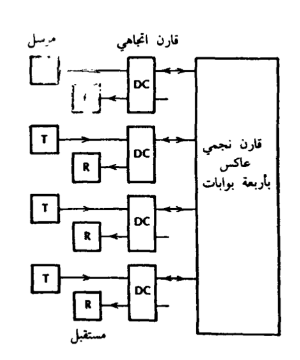
(9 ـ 3) ـ القوارن النجمية Star Couplers

ان تقنية القوارن الاتجاهية المستدقة ثنائية المخروط المندمجة يمكن ان توسع لانتاج قوارن لها أكثر من أربعة بوابات . يبين الشكل (9 ـ 19) قارناً نجمياً ارسالياً 8 × 8 وقارناً نجمياً انعكاسياً بثمانية بوابات . تلف الألياف المنفردة حول بعضها البعض وتصهر وهي بحالة شد .

في النوع النجمي الإرسالي تخرج القدرة الداخلة في أي بوابة على أحد جانبي القارن من جميع البوابات على الجانب الآخر مقسمة عليها بالتساوي . ومن الناحية المثالية تعزل البوابات الواقعة على الجانب ذاته من القارن عن بعضها البعض . يبين الشكل (9 ـ 7) كيف يربط القارن النجمي الإرسالي نهايات ببعضها .



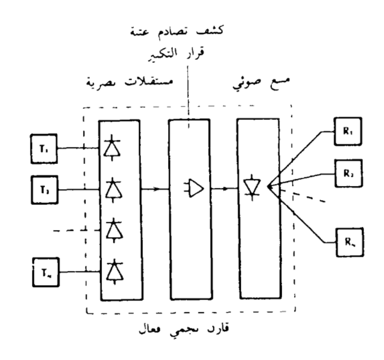
شكل (9 ـ 19) ـ قارنان نجميان . (a) ـ نجمي إرسالي (b) نجمي انعكاسي .



شكل (9 ـ 20) ـ شبكة قارن نجمي انعكاسي .

يقرن النوع النجمي الانعكاسي الضوء من أي بوابة إلى البوابات الأخرى جميعها . ويربط النهايات كما يبينه الشكل (9 ـ 20) . وحيث ان كل ليف موصل إلى النجمة يحمل كلاً من المعطيات المرسلة والمستقبلة لذلك يستعمل قارن اتجاهي لفصل الإشارتين عند كل نهاية .

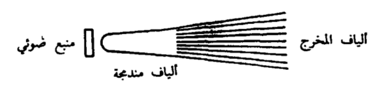
ان القوارن النجمية الموصوفة في الفقرات السابقة هي أجهزة منفعلة . وتتميز بالموثوقية والكلفة المنخفضة عندما تقارن بالأجهزة الفعالة . وعلى أية حال يمكن ان تكون الشبكات النجمية الفعالة مفيدة جداً في تحقيق شبكات منطقة محلية (LAN) . يبين الشكل (9 ـ 21) مخططاً لشبكة نجمية فعالة .



شكل (9 ـ 21) ـ شبكة نجميّة فعالة .

تعمل النجمة الفعالة كمكرر حيث تستقبل الإشارة من أي مرسل فتحولها من شكل ضوئي إلى شكل كهربائي وتكبر التيار الناتج . يقود هذا التيار منبعاً ضوئياً فينتج من جديد إشارة ضوئية . يقسم المنبع الضوئي قدرته بالتساوي بين جميع المحطات المستقبلة . يبين الشكل (9 ـ 22) طريقة لتحقيق تقسيم

القدرة . ان ألياف الخرج المندمجة ببعضها والمستدقة بشكل مخروطي تتقاسم الضوء المنبعث من المنبع .



شكل (9 ـ 22) ـ اقتران منبع مقسم للقدرة .

يمكن ان تتضمن النجمة الفعالة تدابير لكشف التصادم بين مجموعات المعطيات المرسلة بآن واحد من المطاريف المختلفة . فإذا حدث التصادم يرسل المكرر إشارة إلى المحطات لاتخاذ اجراءات تصحيحية. تضيف النجمات الفعالة مرونة إلى شبكة التوزيع نتيجة ميزاتها المتطورة والكاشفة للتصادم .

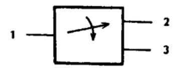
(9 ـ 4) ـ المفاتيح Switches

تبدل المفاتيح البصرية الليفية وجهة الإشارات البصرية وتفيد في شبكات التوزيع وتجهيزات القياس والتجارب وفي غير ذلك . سنصف منها جهازين : المفتاح ذو الموضعين ومفتاح التحويل (Bypass) . يوضح هذان المثالان بعضاً من الصفات العامة للمفاتيح الليفية .

يبين الشكل (9 ـ 23) مفتاحاً ذا وضعين . يمكن للدخل عند البوابة 1 أن ينتقل إلى أي من البوابتين 2 أو 3 . من أجل التعاريف التالية نفترض ان المفتاح في وضع الاقتران إلى البوابة 2 . تكون خسارة الادخال (Insertion Loss) بالديسيبل كما يلي :

$$L_{IL} = -10 \log (p_2/p_1) \qquad (11\text{-}9)$$

حيث p_1 هي القدرة الواصلة إلى البوابة 1 و p_2 هي القدرة المنبثقة من البوابة 2 . تعتمد خسارة الادخال على تراصف الليف تماماً كخسارة الموصل البسيط . يمكن الحصول على خسارات أقل من 1.5 dB بمفاتيح ميكانيكية جيدة .



شكل (9 ـ 23) ـ مفتاح ذو وضعين .

ان اللغط (Crosstalk) هو مقياس لجودة عزل البوابة غير المقترنة ويعطى بالعلاقة التالية :

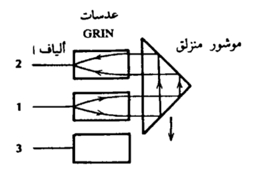
$$L_{CT} = -10 \log (p_3/p_1) \qquad (12\text{-}9)$$

حيث p_3 هي القدرة المنبثقة من البوابة 3 . ويعتمد اللغط على التصميم الخاص للمفتاح وتعد القيم 40 dB إلى 60 dB قيماً نموذجية . إضافة إلى خسارة الادخال المنخفضة فان للمفتاح الجيد نفس قيمة خسارة الادخال لجميع وضعياته .

ان التكرارية المعيارية (وهي تحقيق خسارة الادخال ذاتها في كل مرة يعاد فيها المفتاح إلى نفس الوضع) يمكن ان تكون أكثر أهمية من قيمة خسارة الادخال ذاتها . ان المفتاح الجيد سينتج من جديد خسارة الادخال ذاتها . بفارق يبلغ حوالي 0.1 dB .

ان سرعة النقل (وهي السرعة التي ينتقل فيها المفتاح من أحد الوضعين إلى الوضع الآخر) هي عامل حاسم في بعض التطبيقات . يمكن ان يتم النقل بطريقة كهرميكانيكية . في هذا النوع من الأجهزة يَجذب مغناطيسٌ كهربائي منشط مادة مغناطيسية يرتبط بها جهاز بصري . يمكن للمرايا والعدسات والمواشير (وحتى الألياف ذاتها) ان تتحرك بهذه الطريقة . وعندما يتحرر المغناطيس الكهربائي . يعيد نابضٌ حاملَ المغناطيس إلى وضع راحته . . يمكن الحصول على أزمان نقل من فئة بضعة ميللي ثانية بمفاتيح كهرميكانيكية .

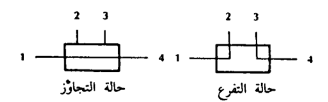
يبين الشكل (9 ـ 24) مفتاحاً ذا وضعين يتألف من موشور منزلق وعدسات ربعية الخطوة مرتبطة بكل ليف . في الوضع المبين يقرن الضوء بين البوابتين 1 و 2 . ولنتابع تقدم الدخل عند البوابة 1 . توازي عدسة GRIN الحزمة المتباعدة الصادرة عن الليف . يحرف الموشور قائم الزاوية الضوء بسبب



شكل (9 ـ 24) ـ مفتاح ذو وضعين بموشور منزلق .

الانعكاس الداخلي الكلي عند سطحيه المائلين . وتبئر عدسة GRIN الحزمة المتوازية على الليف 2 . من أجل توجيه الضوء من البوابة 1 إلى البوابة 3 يتحرك الموشور في الاتجاه المبين في الشكل فتتراصف الحزمة بين الليفين 1 و 3 . نحتاج إلى عدسات توازي من أجل إلغاء خسارة الادخال التي يسببها انتشار الحزمة وللتأكد من أن الأشعة كلها تصدم السطحين العاكسين للموشور بعد الزاوية الحرجة . ان الموشور قائم الزاوية ليس فقط يعكس الضوء بل انه ينقل كذلك الحزمة موازية إلى نفسها فهو يراصف زاوياً وبفعالية ألياف الدخل والخرج .

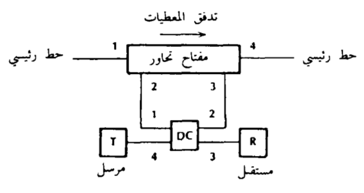
يبين الشكل (9 ـ 25) وظائف مفتاح التحويل . في حالة التحويل تقترن البوابتان 1 و 4 وتبقى البوابتان 2 و 3 معزولتين . وفي حال التفرع تقترن البوابتان 1 و 2 وكذلك البوابتان 3 و 4 . يمكن ان يدخل مفتاح التحويل في شبكة T (أو شبكة حلقية) وذلك بربطه بقناة رئيسة للمعطيات وفقاً للطريقة



شكل (9 ـ 25) ـ مفتاح تحويل .

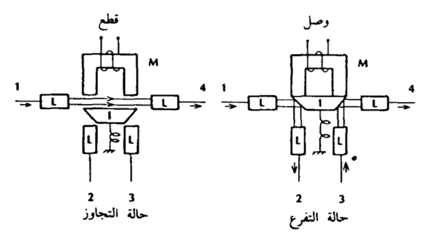
المشار إليها في الشكل (9 ـ 26) . يمكن تجاوز النهاية المبينة أو إدخالها في الشبكة بحسب الرغبة . ويمكن تجاوز محطة ليست مرسلة ولا مستقبلة .

يمكن توصيل مكرر إلى قناة رئيسة للمعطيات ليحل محل النهاية في الشكل (9 ـ 26) . فإذا احتاج المكرر إلى إصلاح فيمكن تجاوزه من غير توقيف كامل الشبكة . يقدم المفتاح ميزة الأمان من الأعطاب في هذا التطبيق . ويمكن إدخال مكرر ثانٍ (مرتبط أيضاً إلى القناة الرئيسة بواسطة مفتاح تحويل) إلى الشبكة ليحل محل مكرر لا يعمل بشكل سليم . ان هذه الخطة التي تستعمل مبدأ التجهيزات الزائدة عن الحاجة (Redundancy) تحسن من موثوقية الشبكة على حساب زيادة تعقيد النظام .



شكل (9 ـ 26) ـ مفتاح تحويل مشترك في تفريعة لشبكة T (أو شبكة حلقية) .

يبين الشكل (9 ـ 29) مفتاح تحويل كهرميكانيكي . في حالة التحويل يمر الضوء مباشرة بين البوابتين 1 و 4 . وفي حالة التفرع تقرن المرآتان الضوء بين



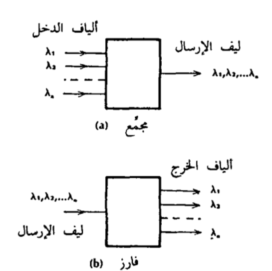
شكل (9 ـ 27) ـ مفتاح تحويل . حيث L هي عدسة GRIN و M مغناطيس كهربائي و I قضيب حديدي ذو وجهي نهايتين مرآويتين .

البوابتين 1 و 2 وبين البوابتين 3 و 4 . توازي عدستا GRIN الحزمة من أجل تنقيص خسارة الإدخال حتى الحد الأدنى . يرتفع قضيب حديدي مجهز بمرآتين عند نهايتيه عندما ينشط المغناطيس الكهربائي . وينتج هذا حالة التفرع . وعندما يقطع تيار المغناطيس يقوم نابض بسحب القضيب المعدني من المسار البصري فيعيد المفتاح إلى حالة التحويل .

(9 ـ 5) ـ تجميع التقسيم حسب طول الموجة

Wavelength-Division Multiplexing (WDM)

تنتشر الحزم البصرية ذات أطوال الموجة المختلفة من غير تداخل فيما بينها وهكذا يمكن ان ترسل معاً في وقت واحد وفي ليف واحد عدة أقنية معلومات (لكل منها طول موجة حاملة مختلف) . ان هذا النظام ويسمى تجميع التقسيم حسب طول الموجة (WDM) يزيد سعة الليف لحمل المعلومات . لقد حددنا في الفصول 3 و 4 و 5 حدود السعة العائدة إلى تشتيت المادة وتشتيت دليل الموجة والتشوه الظاهري . وتنطبق هذه الحدود على المعلومات المحولة عن أي طول موجة . ان تزايد عدد الحوامل يزيد السعة بشكل طردي .

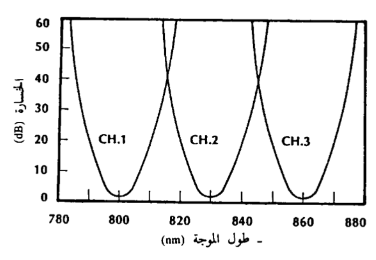


شكل (9 ـ 28) ـ مخطط لمجمِّع بصري (a) ولفارز بصري (b) .

يقرن مجمِّع بصري الضوء من منابع مستقلة إلى ليف الإرسال كما يبينه الشكل (9 ـ 28) . وعند محطة الاستقبال يعمل فارز (Demultiplexer) بصري على فصل الحوامل المختلفة قبل ان يتم الكشف الضوئي للإشارات الفردية (انظر الشكل 9 ـ 28) . وعموماً يكون للمجمعات والفارزات ألياف عند بوابات دخلها وخرجها . ومن الممكن أيضاً استبدال ألياف الدخل في المجمع بمنابع بصرية متكاملة مباشرة في الجهاز . وبالمثل يمكن لمكاشيف ضوئية ان تحل محلَ ألياف الخرج في الفارز . وغالباً يمكن للجهاز ذاته ان يعمل كمجمِّع وفارز .

إن خسارة الإدخال ومقدار اللغط هما الصفتان الهامتان للمجمعات والفارزات . فخسارة الإدخال هي مقدار تخامد الموجة المنتشرة من بوابة الدخل إلى بوابة الخرج المرغوبة . مثلاً بالإشارة إلى الشكل (9-28-a) تكون خسارة الإدخال للقناة 1 هي الجزء من قدرة الدخل عند طول الموجة λ_1 الذي يفقد حتى يصل ليف الإرسال . يكون المجمع/الفارز متماثلاً عندما تكون خسارة الإدخال ذاتها تقريباً لكل قناة . وان اللغط هو قدرة الموجة مقيسة عند أية بوابة غير مقصودة . مثلاً بالإشارة إلى الشكل (9-28-b) يكون اللغط هو الجزء من قدرة الدخل عند طول الموجة λ_1 الذي يصل إلى ليف الخرج المخصص لطول الموجة λ_2 . يكون اللغط مشكلة رئيسة عند المستقبل حيث يمكن ان يؤدي اختلاط قناتين أو أكثر إلى تداخل خطير مع الإشارة المرغوبة .

يبين الشكل (9 ـ 29) منحنيات الخسارة الممكنة لفارز . تتولد المنحنيات من تطبيق حزمة ضيقة النطاق (تقريباً طول موجة وحيد) عند المدخل وقياس القدرة المرسلة إلى كل من أقنية الخرج . تقدم الثنائيات الليزرية (أو الضوء من منبع وحيد اللون) حلاً منطقياً مناسباً . فيغيَّر طول موجة المنبع ويكرَّر القياس إلى أن يغطى المدى الطيفي المرغوب . وتكون النتيجة هي رسماً بيانياً يبين علاقة كل من خسارة الإدخال واللغط بطول الموجة .



شكل (9 ـ 29) ـ خسارة الفارز . وتظهر القدرة المقيسة في أقنية الخرج 1 و 2 و 3 .

مثال :

قدّر خسارة الإدخال ومقدار اللغط للفارز المبين في الشكل (9 ـ 29) إذا كان طول موجة الدخل 805 nm وعرض خط المنبع 1 nm .

الحل :

حيث ان عرض الخط صغير للغاية فيمكن تجاهله . وبموجب الشكل تكون القدرة الواصلة إلى القناة 1 أقل بخمسة ديسيبل من قدرة الدخل . وتنخفض القدرة في القناتين 2 و 3 بأكثر من 60 ديسيبل تحت قدرة الدخل . وهكذا تكون خسارة الإدخال 5 dB ويكون اللغط أكبر من 60 dB .

في المثال السابق كان العرض الطيفي للمنبع مهملاً وهذه حالة تقع عملياً باستعمال الثنائيات الليزرية . ان عروض الخط لثنائيات الـ LED كبيرة للغاية (من 20 nm إلى 100 nm) لذلك لا يمكن تجاهلها .

مثال :

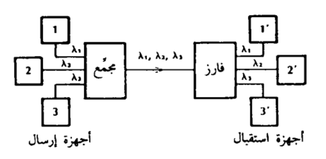
قدّر خسارة الإدخال ومقدار اللغط للفارز المبين في الشكل (9 ـ 29) إذا حدد طول موجة الدخل بـ 800 nm و 830 nm و 860 nm وكان عرض خط المنبع 30 nm .

الحل :

ان المنبع 800 nm يشع بين 785 nm و 815 nm . تتغير خسارة الإدخال فوق هذا المدى من قيمة عظمى مقدارها 40 dB (عند حواف النطاق) إلى قيمة صغرى مقدارها 2 dB (عند طول الموجة المركزي) . تعتمد خسارة الإرسال النهائية على الطريقة الدقيقة التي تتوزع فيها القدرة فوق المدى 30 nm . وحيث ان منحنى الخسارة في الشكل (9 ـ 29) مسطح تقريباً حول 800 nm وحيث ان معظم قدرة المنبع تقع قريبة من 800 nm فان الخسارة الإجمالية ستكون أقرب إلى 2 dB منها إلى 40 dB . وسيكون التقدير المعقول لخسارة الإدخال من 5 dB إلى 6 dB . ويكون اللغط من القناة 1 إلى القناة 2 ذا قيمة عظمى مقدارها 40 dB عند 815 nm . ويكون الاقتران للاشعاع ما دون 815 nm إلى القناة 2 ضعيفاً . وتكون قدرة اللغط الكلية أقل من سوية الدخل بأكثر من 40 dB . يكون اللغط من القناة 1 إلى القناة 3 أكثر من 60 dB .

إذا كان عرض خط المنبع في المثال الأخير أكبر من 30 nm ستزداد خسارة الإدخال وسيصبح اللغط أسوأ . يوضح هذا ميزات المنابع ذات الحزمة الضيقة من أجل أنظمة WDM . وبالإضافة فكلما كان عرض خط المنبع أصغر كلما ازداد عدد الأقنية التي يمكن ان تنحصر ضمن المدى من 800 nm إلى 900 nm . وبالطبع إذا كان مرغوباً عدد أقنية أكثر فانه يجب تصميم مجمعات وفارزات قادرة على جمع حوامل ذات تباعدات صغيرة جداً وفصلها .

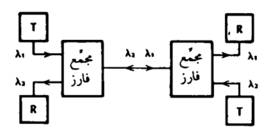
يوضح الشكل (9 ـ 30) نظام (WDM) بثلاثة أقنية . ان هذه الشبكة بأبسط أشكالها هي شبكة وحيدة الاتجاه . ويمكن على أي حال ان تعمل في كلا الاتجاهين إذا كانت أجهزة فصل طول الموجة ثنائية الاتجاه . سنرى لاحقاً في



شكل (9 ـ 30) ـ شبكة تجميع التقسيم بحسب طول الموجة

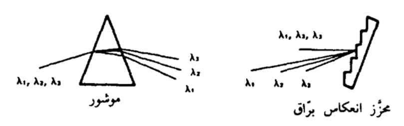
هذه الفقرة كيف يمكن بناء مثل هذه الأجهزة . وعند العمل بالاتجاهين يجب ان يحتوي كل مطراف على قوارن اتجاهية بغية فصل الأمواج المستقبلة والأمواج المرسلة .

ان الأنظمة المنشأة سابقاً والمصممة للعمل بحامل مفرد يمكن ان تتحسن بواسطة تجميع التقسيم المؤسس على طول الموجة WDM . ونحتاج فقط ان نغير تجهيزات النهاية . ويمكن للألياف الأصلية ان تبقى بمكانها . يمكن ان يستعمل WDM لانتاج شبكة تشغيل مزدوج كلياً كما يبينه الشكل (9 ـ 31) .



شكل (9 ـ 31) ـ شبكة مزدوجة كاملة . T المرسل-و R المستقبل و مجمع/فارز ثنائي الاتجاه .

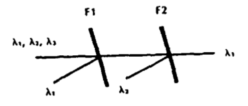
تؤسس تصاميم المجمع على احدى آليتين : التشتيت الزاوي أو الترشيح البصري . يوجد جهازان يعرضان تشتيتاً زاوياً وهما الموشور ومحزَّزة الانعراج (Diffraction Grating) العاكسة . يبين الشكل (9 ـ 32) كيف تفصل هذه العناصر ثنائية الاتجاه (أو تجمع) الحزم ذات أطوال الموجة المختلفة . يمكن أن



شكل (9 ـ 32) ـ التشتيت الزاوي .

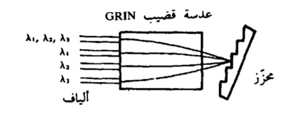
تغلف المحززة بطبقة معدنية بغية تحسين عاكسيتها . تتألف المراشيح البصرية المرسومة في الشكل (9 ـ 33) من طبقات رقيقة من مواد شفافة ذات أدلّة انكسار مختلفة . يؤدي التداخل ضمن الأغشية الرقيقة إلى ان يمرر المرشاح أطوال موجة معينة ويعكس الأخرى . يبين الشكل مرشاحين متتاليين يفصلان (أو يجمعان) ثلاثة أطوال موجة .

تضم المجمعات/الفارزات غالباً عدسات من أجل التقاط الأشعة المتباعدة الصادرة عن ليف دخل وتوجيهها إلى عناصر التجميع والفصل ولتبئر من جديد الضوء على ليف الخرج . وبدون العدسات ستكون خسارة الثغرة بين ليفي الدخل والخرج كبيرة . تؤدي العدسات وظيفة ضرورية أخرى فهي توازي الحزمة الواردة على عنصر انتخاب طول الموجة وهذا ضروري لأن مكونات التشتيت الزاويّة والمراشيح البصرية حساسة لزاوية الورود . وان الأشعة الواردة المتباعدة ستتباعد أيضاً عند مخرج عنصر الانتخاب وسيشغِل كل طول موجة مدى من الزوايا . وسينقص هذا بدوره من إمكانية الفصل الفراغي لأطوال الموجة الفردية الموجودة .



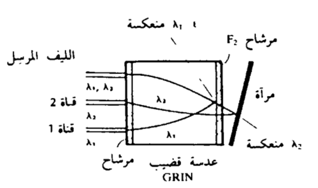
شكل (9 ـ 33) ـ الترشيح البصري . يعكس المرشاح F_1 الموجة λ_1 ويرسل كلاًّ من λ_2 و λ_3 بينما يعكس المرشاح F_2 الموجة λ_2 ويرسل λ_3 .

من أجل ان نشرح بعضاً من تقنيات الانشاء المتوفرة سنصف اثنين من المجمِّعات . لنعتبر أولاً المجمع المحزَّز المرسوم في الشكل (9 ـ 34) . ومن أجل التبسيط تظهر فقط الأشعة المركزية المرافقة لكل ليف . وعلى أي حال تتباعد الحزم المغادرة لليف وتتقارب الحزم التي تدخل الليف . وتتوازى الحزم في الفراغ بين العدسات والمحزَّز . يكون الليف الأعلى هو خط إرسال النظام وعندما يستعمل كفارز تدخل أطوال الموجة λ_1 و λ_2 و λ_3 العدسة القضيبية GRIN ربعية الخطوة من خط الإرسال . توازي العدسة الحزمة قبل ان تصدم الأشعة المحزَّز . يفصل المحزَّز أطوال الموجة الثلاثة فراغياً وبعد ذلك تبئر العدسات الحزم المتوازية الموزعة زاوياً على ألياف الخرج الثلاثة . ان هذا الجهاز ثنائي الاتجاه فعندما يستعمل كمجمِّع ينعكس اتجاه مسير الشعاع . تُجمَّع المداخل عند الألياف الثلاثة بواسطة المحزَّز وتبأَّر على خط الإرسال (الليف الأعلى) .



شكل (9 ـ 34) ـ مجمع/فارز محزَّز . ترسم فقط الأشعة المحورية لليف .

ان المجمع الثاني المرسوم في الشكل (9 ـ 35) يستخدم عدسة قضيبية GRIN ومراشيح بصرية . يمرر المرشاح F_1 طول الموجة λ_1 ويعكس λ_2 بينما يمرر المرشاح F_2 طول الموجة λ_2 ويعكس λ_1 . وكما في المجمّع المحزَّز في الشكل (9 ـ 34) توازي العدسة الضوءَ المنبعث من الألياف وتبئر الحزم على ألياف الخرج بعد ان تكون الأشعة قد انعكست بواسطة المرشاح F_2 أو المرآة . وعندما يستعمل كمجمع يدخل طولا الموجة λ_1 و λ_2 العدسة من الليف الأعلى . يعكس المرشاح F_2 القدرة عند طول الموجة λ_1 . وتسير هذه الحزمة باتجاه الليف الأسفل حيث تمر خلال المرشاح F_1 وتدخل القناة 1 . وفي أثناء ذلك يمرر المرشاح F_2 القدرة عند طول الموجة λ_2 . وتنعكس هذه الحزمة بواسطة المرآة المائلة التي توجه



شكل (9 ـ 35) ـ مجمِّع/فارز من نوع المرشاح . F_1 يمرر λ_1 ويعكس λ_2 . F2 يمرر λ_2 ويعكس λ_1 .

الأشعة نحو القناة 2 لالتقاطها . ان المرشاح F_1 الذي يعكس λ_2 يحسن اللغط بإنقاص كمية القدرة عند λ_2 التي تصل القناة 1 حتى الحد الأدنى . وعندما يعمل كمجمع تدخل λ_1 العدسة من القناة 1 وتدخل λ_2 من القناة 2 . يجمع المرشاح F_2 والمرآة والعدسة طولي الموجتين على ليف الإرسال ولا يكون المرشاح F_1 مطلوباً في حالة المجمِّع .

مع انه يمكن إيجاد عدة أنواع مختلفة من المجمِّعات والفارزات من النوع المحزّز والمرشاح فان المثالين الواردين في الشكلين السابقين يشيران إلى بضعة من العناصر الأساسية لبناء وتصميم المجمِّعات . ان الأجهزة الموصوفة بسيطة تستعمل العدسة ذاتها للاقتران ببوابتي الدخل والخرج . وتستعمل بعض تصاميم المجمِّع عدسات مستقلة لكل بوابة . ان ميزة البنية الأخيرة هي ان كل عدسة يمكن ان تستعمل محورياً . أي أن الألياف تربط إلى محور العدسة وليست منزاحة عنه كما في الشكلين (9 ـ 34) و(9 ـ 35) . ان للعدسات خسارات زيغ أقل عندما تستعمل محورياً .

(9 ـ 6) ـ الخلاصة

يمكن ان تطبق تكنولوجيا الألياف البصرية على شبكات الاتصالات ثنائية الاتجاه ومتعددة النهايات باستعمال التقنيات الأساسية الواردة في هذاالفصل .تزيد قدرة الشبكات متعددة النهايات من جاذبية بصريات الليف . تتوفر عدة بنى

شبكات بديلة وتتضمن مجموعات بشكل T أو نجمية أو حلقية أو هجينة لبنى أساسية . وتتوفر أيضاً عدة مكونات نظم مثل (قوارن اتجاهية وقوارن ارسال نجمية وقوارن انعكاس نجمية ومفاتيح ومجمعات وفارزات) . يجب على مصمم النظام ان يفهم الخطط البديلة العديدة لكي يختار أفضلها .

ان نهجاً شاملاً للتصميم ليس عملياً بسبب تنوع التطبيقات الممكنة للشبكات متعددة النهايات . وعلى أي حال يمكن اطلاق بضعة تعميمات : يجب ان يعتبر المصمم كمية الليف المطلوبة وخسارات النظام . عندما يوصل عدد من النهايات تتطلب عادة شبكة T ليفاً أقل مما تتطلبه شبكة نجمية . ومن أجل أنظمة تغطي منطقة واسعة يمكن ان يكون التوفير الذي ينتجه انقاص طول الليف الكلي حتى الحد الأدنى مهماً . ان الموقع والمسافة بين النهايات يمليان كمية الليف الضرورية وكذلك التركيبة المثلى للشبكة .

تزداد الخسارات في شبكة T مع زيادة عدد النهايات بأسرع من تزايد الخسارات في شبكة نجمية فتتميز الشبكة النجمية بهذا الخصوص . وبالإضافة يسلِّم النظامُ النجمي نفس القدرة تقريباً إلى كل نهاية . ولا تتغير القدرة المستلمة عندما يتم الإرسال من نهاية أخرى . وفي شبكة T تختلف القدرة التي تصل كل مستقبل . ان المستقبل الذي يقع قريباً من المرسل (المرسل والمستقبل عند نقاط تفرع متجاورة على طول خط المعطيات الرئيس) يستقبل قدرة أكثر مما يستقبله مستقبل يقع على بعد عدة نقاط تفرع . وعندما ترسِل نهاية مختلفة تتغير سويات القدرة وذلك لان المستقبلات تقع الآن في مواقع مختلفة بالنسبة للمرسل . لذلك يجب ان تعمل المستقبلات في شبكة T على مدى واسع من سويات قدرة الدخل أي أنها يجب ان تملك مدى ديناميكياً كبيراً . يمكن ان تكون الخسارات في شبكة T كبيرة إذا كان النظام يحتوي أكثر من بضعة نهايات .

في وصلة من نقطة إلى نقطة تعوض المكررات المكبرة تخامد الألياف الطويلة . وفي الشبكات متعددة النهايات تتجاوز خسارات التوزيع غالباً خسارات تخامد الليف . وفي هذه الحال يمكن ان تستعمل المكررات للتغلب

على خسارات التوزيع فيزيد هذا بالتالي عدد النهايات المسموح بها . تزيد المكررات تعقيد وكلفة النظام إلا انها تحل مشاكل سوية القدرة .

تزيد المجمعات من كمية المعلومات التي يمكن إرسالها على طول ليف وحيد بالسماح لعدة حوامل بالانتشار بآن واحد . ان مطاريف التجميع أكثر تعقيداً بكثير من مطاريف الحامل الوحيد . وان سعة النظام المضافة يمكن أن تعوض بسهولة تعقيد المطراف المتزايد .

طبقت الألياف في البداية بشكل كبير على وصلات الهاتف من نقطة إلى نقطة والوحيدة الاتجاه . وهي أكثر شمولاً مما كان يعتقد حيث تظهر الآن في الأنظمة المعقدة التي تتطلب توزيعاً مطوراً للإشارات البصرية . تتضمن تطبيقات الشبكات متعددة المطاريف شبكات منطقة محلية ومدناً مليّفة .

مسائل الفصل التاسع

9 ـ 1 ـ لقارن اتجاهي بأربعة بوابات مثالي نسبة انشطار مقدارها 1:4 .
أ ـ ما هو مقدار الجزء من قدرة الدخل الذي يصل إلى كل بوابة ؟
ب ـ احسب خسارة التدفق وخسارة التفرع والاتجاهية والخسارة الفائضة .

9 ـ 2 ـ لقارن اتجاهي بأربعة بوابات نسبة انشطار مقدارها 1:4 وخسارة فائضة مقدارها 2 dB واتجاهية القارن مقدارها 40 dB .
أ ـ ما هو مقدار الجزء من قدرة الدخل الذي يصل إلى كل بوابة ؟
ب ـ احسب خسارة التدفق وخسارة التفرع .
جـ ـ احسب الخسارة بالديسيبل العائدة إلى الاشعاع والتناثر والامتصاص في القارن .

9 ـ 3 ـ اعتبر الشبكة مزدوجة الاتجاه المبينة في الشكل (9 ـ 2) التي يستعمل فيها قوارن 3-dB مثالية وألياف وموصلات مثالية . احسب الخسارة الكلية من المرسل إلى المستقبل بالديسيبل .

9 ـ 4 ـ كرِّر المسألة (9 ـ 3) إذا كان لكل من القوارن المثالية خسارة زائدة مقدارها 1.5 dB وكانت خسارة الموصلات جميعها 0.8 dB (موصل عند كل

بوابة قارن اتجاهي وموصل عند المرسل وآخر عند المستقبل) وكانت خسارة الليف 4-dB .

9 ـ 5 ـ تبنى شبكة T بخمسة نهايات (مطاريف) كالمبينة في الشكل (9 ـ 3) . وان قوارن T هي كالمبينة في الشكل (9 ـ 4) . افترض قوارن 3-dB مثالية وألياف مثالية وموصلات من غير خسارة .

أ ـ ارسم الشبكة كاملة .

ب ـ احسب خسارة الإرسال إلى كل من المستقبلات عندما يكون الطرف 1 هو المرسل .

9 ـ 6 ـ كرِّر المسألة (9 ـ 5) عندما تستعمل قوارن 10-dB مثالية . قارن نتائج هذه المسألة بنتائج المسألة (9 ـ 5) . أي القارنين ، الـ 3-dB أم الـ 10-dB ، هو الأفضل .

9 ـ 7 ـ كرِّر المسألة (9 ـ 5) عندما تكون الخسارة الزائدة لكل واحد من القوارن الاتجاهية 1.5 dB وخسارة الموصلات جميعها 0.8 dB وخسارة الليف 35 dB/km والمسافة بين كل نهايتين 100 m وخارة الوصلات الدائمة 0.2 dB . (ان عدد الوصلات الدائمة و/أو الموصلات يعود إليك لكي توصفه وتأكد ان تضمِّنهم في رسمك للشبكة) .

9 ـ 8 ـ شبكة نجمية (كالمبينة في الشكل 9 ـ 6) توصل خمسة مطاريف . افترض قوارن مثالة وموصلات وألياف مثالية .

أ ـ ارسم مخططاً للشبكة .

ب ـ إذا كان الطرف 1 هو الذي يرسل فاحسب خسارة الإرسال الكلية بالديسيبل إلى كل واحد من المستقبلات .

9 ـ 9ـ كرِّر المسألة (9 ـ 8) عندما تكون الخسارة الزائدة للقارن النجمي 2 dB وخسارات الموصل 0.8 dB وخسارات الوصلة الدائمة 0.2 dB وخسارة الليف 35 dB/km . تبعد الأطراف 1 ، 2 ، 3 ، 4 ، عن القارن النجمي مسافة 100 m ويبعد الطرف 5 عنه مسافة 20 m . (الحظ جميع الموصلات والوصلات الدائمة التي تفكر انك تحتاج إليها على مخططك) .

9 ـ 10 ـ ارسم بيانياً الخسارة مقابل عدد المطاريف (2 إلى 20 مطراف) لشبكة نجمية إذا كان للنجمة خسارة الـ 3-dB الزائدة وكان لكل بوابة من بوابات النجمة موصل ذو خسارة 0.8 dB . اهمل خسارات الليف وخسارتي موصل المرسل وموصل المستقبل . ان النتيجة ستكون الخسارة المرتبطة بالقارن النجمي .

7 ـ 11 ـ مفتاح ذو وضعين (كما في الشكل 9 ـ 23) يعمل بتوضيع ليف مرن للدخل ميكانيكياً بحيث أن الليف يتراصف مع أي من ليفي الخرج كما هو مطلوب . ان الألياف هي SI متعددة الأساليب وقطر كل منها هو 100 μm . احسب عدم التراصف الجانبي الأعظمي المسموح به إذا توجب ان تكون الخسارة أقل من 1.5 dB .

9 ـ 12 ـ كرِّر المسألة (9 ـ 11) إذا كان كل ليف ينتهي بعدسة GRIN توسع الحزمة إلى 1 mm .

9 ـ 13 ـ ارسم مخططاً لشبكة WDM مزدوجة الاتجاه كاملة بأربعة أقنية . اختر مخططات نوعية لقارن اتجاهي ومجمِّعات وفارزات وارسم بوضوح المسارات التي تأخذها الموجات الأربعة ذات الأطوال المختلفة .

9 ـ 14 ـ كرِّر المسألة (9 ـ 5) إذا كان المطراف 2 هو المرسل .

6 ـ 15 ـ كرِّر المسألة (9 ـ 6) إذا كان المطراف 2 هو المرسل .

المراجع

الفصل التاسع

1. Two general references covering distribution networks are:
John Joseph Esposito. "Optical Connectors, Couplers. and Switches." In *Handbook of Fiber Optics: Theory and Applications*, edited by Helmut F. Wolf. New York: Garland Publishing, Inc., 1979. pp. 241-303.
Michael K. Barnoski. "Design Considerations for Multiterminal Networks." In *Fundamentals of Optics Fiber Communictions*. 2d ed., edited by Michael K. Barnoski. New York: Academic Press, Inc., 1981. pp. 329-51.
2. B. S. Kawasaki and K. O. Hill. "Low-Loss Access Coupler for Multimode Optical Fiber Distribution Networks." *Appl. Opt.* 16, no. 7 (June 1977): 1794-95.
3. F. Auracher and H.-H. Witte. "New Planar Optical Coupler for a Data Bus System with Single Multimode Fibers." *Appl. Opt.* 16, no. 8 (August 1977): 2195-97.
4. W. J. Tomlinson. "Applications of GRIN-Rod Lenses in Optical Fiber Communications Systems." *Appl. Opt.* 19, no. 7 (April 1980): 1127-38.
5. Ibid.
6. Narinder S. Kapany. "A Family of Kaptron Fiber Optics Communications Couplers." In *Proc. of the Third International Fiber Optics and Communications Exposition,* (Information Gatekeepers, Inc.) San Francisco, Septermber 1980. p. 172.
7. Michael Barnoski. "Design Considerations for multiterminal Networks." pp. 334-40.
8. Eric G. Rawson, Ronald V. Schmidt, Robert E. Norton, M. Douglas Bailey, Lawrence C. Stewart, and Hallam G. Murray. "Fibernet II: An Active Stra-Configured Fiber- Optic Local Computer Network with Data Collision Sensing." In *Digest of the Topical Meeting on Optical Fiber Communication.* Phoenix, Arizona: (Optical Society of America), April 1982. pp. 22-23.
9. Tomlinson. "Applications of GRIN-Rod Lenses." pp. 1123-33.

10. M. Nunoshita and Y. Nomura. "Optical Bypass Switch for Fiber-Optic Data Bus Systems." *Appl. Opt.* 19, no. 15 (August 1980): 2574-77.
11. Tomlinson. "Applications of GRIN-Rod Lenses." pp. 1133-34, 1137-38.
12. F. Tanaka, S. Kishi, and T. Tsutsomi. "Fiber-Optic Multifunction Devices Using a Single GRIN-Rod Lens for WDM Transmission Systems." *Appl. Opt.* 21, no. 19 (October 1982): 3423-29.

الفصل العاشر

التعديل

Modulation

قيّمنا في الفصول السابقة الوصلات الليفية على أساس سعتها للمعلومات (مقيسة بأعلى تردد تعديل للأنظمة التماثلية وبالحد الأعلى لمعدل المعطيات للأنظمة الرقمية) . وفي هذا الفصل ندخل في صيغ رقمية وتماثلية مختلفة مناسبة للشبكات الليفية . ونصف أيضاً تقنيات دارات معينة من أجل تعديل الثنائيات الليزرية (LD) والثنائيات الباعثة للضوء (LED) . تتناول هذه المناقشة بالتفصيل الملاحظات التمهيدية فيما يخص تعديل المنبع الذي ورد في الفصل 6 . ويناقش هذا الفصل أيضاً تجميع التقسيم الزمني وهو طريقة ضم عدة أقنية من المعلومات على ليف باستعمال حامل بصري وحيد .

(10 ـ 1) ـ تعديل الثنائي الباعث للضوء وداراته
Light-Emitting Diode Modulation and Circuits

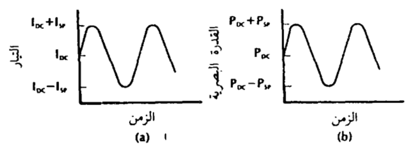
ليس عملياً ان نصف جزءاً صغيراً فقط من الدارات المستعملة أو المقترحة من أجل تعديل ثنائيات الـ LED . وبدلاً عن ذلك سنعرض متطلبات واستراتيجية التعديل الأساسية ونشرحها ببضعة دارات خاصة .

التعديل التماثلي Analog Modulation

يبين الشكل (6 ـ 7) المتطلبات الأساسية من أجل التعديل التماثلي لثنائي LED . يعطى تيار التعديل الكلي والقدرة البصرية الناتجة المبينين في الشكل (10 ـ 1) كما يلي :

$$i = I_{DC} + I_{SP} \cos \omega t \qquad (1\text{-}10)$$

$$P = P_{DC} + P_{SP} \cos \omega t \qquad (2\text{-}10)$$



شكل (10 ـ 1) ـ (a) تيار القيادة لثنائي LED . (b) ـ قدرة الخرج الناتجة .

إن عامل التعديل (Modulation Factor) m' هو تأرجح الذروة بالنسبة لمتوسط التيار مقسوماً على متوسط التيار أي :

$$m' = \frac{I_{SP}}{I_{DC}} \qquad (a\text{-}3\text{-}10)$$

وحيث ان تيار الذروة الكلي وتيار القيمة الدنيا هما $I_{DC}+I_{SP}$ و $I_{DC}-I_{SP}$ على التوالي فان اتساع الإشارة I_{SP} يصل إلى أكبر قيمة له إذا كان انحياز التيار المستمر هو نصف القيمة العظمى المسموح بها لتيار الثنائي . ان جعل $I_{SP}=I_{DC}$ لهذه الحالة ينتج تياراً قيمته عند الذروة $2I_{DC}$ وقيمته الدنيا صفراً وبعامل تعديل يساوي الواحد .

نعرّف عامل التعديل البصري بدلالة القدرة البصرية كما يلي :

$$m = \frac{P_{SP}}{P_{DC}} \qquad (b\text{-}3\text{-}10)$$

وهذا يسمح لنا ان نكتب معادلة القدرة البصرية كما يلي :

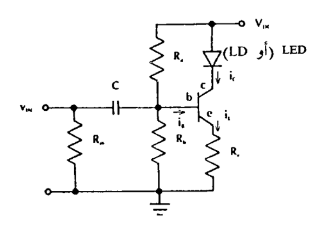
$$P = P_{DC}(1+m)\cos\omega t \qquad (4\text{-}10)$$

وبضم المعادلات (a-3-10) و (b-3-10) و (7-6) ما يلي :

$$m = \frac{m'}{\sqrt{(1 + \omega^2 \tau^2)}}$$

ويبين هذا كيف ان عامل التعديل البصري يتناقص مع تردد التعديل . ومن أجل $\omega \tau << 1$ (التعديل أدنى بكثير من عرض نطاق الحزمة 3 dB لثنائي الـ LED) يكون $m = m'$.

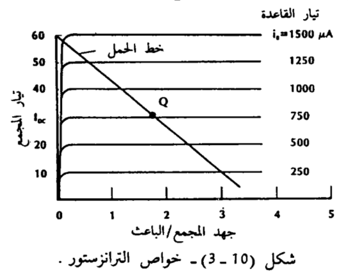
يوجد العديد من دارات التعديل التماثلية لثنائي LED . سنصف واحدة بسيطة وهي دارة المكبر الترانزستوري المرسوم في الشكل (3 ـ 2) . ان تيار



شكل (10 ـ 2) ـ معدِّل تماثلي .

مجمّع الترانزستور i_C هو التيار القائد للثنائي LED . وعندما يستعمل كمكبر تقليدي يستبدل الثنائي LED بمقاومة حمل ويربط على التوازي مع R_e مكثف تجاوز . نستطيع ان نفهم عمل المعدِّل بمساعدة خواص الترانزستور المبينة في الشكل (10 ـ 3) . يقدم جهد المنبع V_{DC} مع المقاومتين R_a و R_b تيار القاعدة المستمرة I_B (تشير الأحرفِ الكبيرة إلى كميات تيار مستمر في هذا التحليل) . يقوم التيار I_B بإحداث انحياز أمامي لوصلة القاعدة الباعث فيحول الترانزستور

إلى حالة توصيل ON (أي يؤدي إلى تدفق تيار مجمّع) . ويكون تيار المجمّع الناتج : $I_C = \beta I_B$ حيث β هو عامل تكبير التيار للترانزستور و I_C هو تيار انحياز الثنائي LED الذي سمي I_{DC} في المعادلة (10 ـ 1) . فبدون إشارة دخل يعمل الترانزستور عند النقطة Q في الشكل (10 ـ 3) . إن هذا يبين ما يسمى التكبير ذو الصنف A وهو المعرَّف بالشرط الذي تكون فيه النقطة Q فوق تيار القطع للمجمِّع بقدر كاف . يحدث القطع عندما يهبط تيار القاعدة إلى الصفر .



شكل (10 ـ 3) ـ خواص الترانزستور .

ينتج جهد الإشارة V_{IN} تيار قاعدة يتغير مع الزمن ويضاف إلى I_B . ان تيار القاعدة المتغير مع الزمن هو نسخة مطابقة مكبرة عن تيار القاعدة المتناوب . يتم اختيار النقطة Q بحيث ان تيار القاعدة الكلي لا يفصل الترانزستور خلال التأرجح السالب ولا يقوده إلى الإشباع خلال التأرجح الموجب . توازن المقاومة R_e نقطة عمل الترانزستور .

نورد فيما يلي مثالاً لتصميم معدِّل تماثلي . سنستعمل ترانزستوراً سيليكونياً ذا الخواص المبينة في الشكل (10 ـ 3) . وسنجعل أيضاً : V_{DC}=50 Volt و R_a=2 kΩ و R_b=5 kΩ و R_{IN}=50 Ω و R_e=60 Ω . نلاحظ من الشكل (10 ـ 3) ان β تساوي حوالى 40 . ان جهد الخرج V_0 على طرفي وصلة القاعدة الباعث المنحازة أمامياً هو بحدود 0.6 V للسيليكون (و 0.2 V للجرمانيوم) . تكون المقاومة المكافئة للمقاومتين R_a و R_b على التوازي كما يلي :

$$R_1 = \frac{R_a R_b}{R_a + R_b} \qquad (5\text{-}10)$$

وتقسم هاتان المقاومتان جهد المنبع عند قاعدة الترانزستور فينتج ما يلي :

$$V_1 = \frac{R_b}{R_a + R_b} V_{DC} = 3.6\ V \qquad (6\text{-}10)$$

ويكون تيار المجمع المستمر :

$$I_C = \frac{\beta\ (V_1 - V_0)}{R_1 + (1+\beta)\ R_e} = 31\ mA \qquad (7\text{-}10)$$

ويكون تيار القاعدة المستمر : $I_B = I_C/\beta = 760\ \mu A$. يتعين خط الحمل بواسطة معادلة الحلقة كما يلي :

$$i_c R_e + v_{CE} + v_d = V_{DC} \qquad (8\text{-}10)$$

حيث v_d هو جهد الثنائي . يهمل تيار القاعدة الصغير المتدفق خلال R_e (أي اننا نفترض أن $i_E \approx i_C$) . يكون جهد الثنائي ثابتاً تقريباً من أجل تيارات أمامية أكبر من بضعة ميللي أمبير . وسنعتبره مساوياً إلى 1.4 V في هذا المثال وتصبح معادلة مقاومة خط الحمل كما يلي :

$$i_C R_e + V_{CE} = 3.6\ V$$

يمكننا بسهولة ان نجد احداثيات عدة نقاط على هذا الخط . عندما : $V_{CE}=0$ يكون $i_C=3.6/60=60\ mA$ محدداً احداثيات النقطة العليا على خط الحمل . عند النقطة Q تكون $i_C=I_{DC}=31\ mA$ وهكذا يكون :

$$V_{CE} = 3.6 - 0.031\ (60) = 1.7\ V$$

لدينا الآن احداثيات النقطة Q ويمكننا ان نرسم خط الحمل على منحنى الترانزستور في الشكل (10 ـ 3) . يمكن ان نرى من الشكل ان تيار القاعدة لا يمكن ان يتجاوز $1400\ \mu A$ بدون إشباع تيار المجمّع . وان هذا يوافق تيار مجمّع أعظمي قيمته 55 mA ولذلك يمكن أن تبلغ قيمة الذروة لتيار إشارة الثنائي

قيمة $55-31=24\ mA$ فينتج عامل تعديل m' يساوي : $m'=24/31\approx0.80$. يمكن ان تعمل هذه الدارة عند تعديل مقداره 81٪ .

ان على المعدِّلات التماثلية ان تنتج تغيرات قدرة بصرية تشبه أشكال موجة جهد الدخل (أو تيار الدخل) بقدر الامكان . تحدث انحرافات إذا لم تكن خواص التيار/القدرة للمنبع خطاً مستقيماً تماماً . ان ارتفاع حرارة الوصلة هو السبب الرئيس لعدم خطية الثنائي LED .

يمكن ان نتقصى عدم خطية ثنائيات الـ LED بنمذجة خواص خرجه بالمعادلة التالية :

$$P = P_{DC} + a_1\, i + a_2\, i^2 \qquad (9\text{-}10)$$

حيث i هو تيار الإشارة و P_{DC} هي القدرة الثابتة التي ينتجها التيار المستمر . يعبر الحد الأخير عن مقدار ابتعاد الثنائي LED عن الخطية . ويمكن إضافة حدود أخرى تتضمن مراتب أعلى من التيار إذا كنا نرغب دقة أكبر .

وينتج دخل جيبي وحيد من الشكل $(i = I \sin \omega t)$ عند إدخاله في المعادلة (10 ـ 9) ما يلي :

$$P = P_{DC} + 0.5a_2I^2 + a_1\, I \sin \omega t - 0.5a_2\, I^2 \cos 2\omega t \qquad (10\text{-}10)$$

ان الحد الأخير الذي يهتز بتردد يساوي ضعفي تردد الإشارة هو التشوه التوافقي الثاني المزعج (Harmonic Distortion) .

نعرّف التشوه التوافقي الكلي (Total Harmonic Distortion, THD) بدلالة القدرة الكهربائية للمستقبل كما يلي :

$$THD = \frac{\text{القدرة الكهربائية في التوافقيات}}{\text{القدرة الكهربائية في المركبة الأساسية}} \qquad (11\text{-}10)$$

وحيث ان القدرة الكهربائية تتناسب مع مربع القدرة البصرية الواردة فانه يمكن كتابة THD بالشكل التالي :

$$\text{THD} = \left(\frac{\text{القدرة البصرية في التوافقيات}}{\text{القدرة البصرية في المركبة الأساسية}}\right)^2 \qquad (12\text{-}10)$$

وعندما نعبر عنها بالديسيبل نكتب :

$$\text{THD}_{dB} = -\ 10 \log \text{THD} \qquad (13\text{-}10)$$

ومن أجل دخل جيبي وحيد نستعمل المعادلة (10 ـ 10) فنجد : $\text{THD} = 0.25\ (a_2 I/a_1)^2$. إن مقدار اللا خطية يختلف اختلافاً كبيراً من ثنائي LED إلى آخر . وان تشوهات بمقدار 30 dB إلى 60 dB تحت سوية الإشارة هي قيم تمثيلية .

ان تيار دخل من الشكل $i = I_1 \sin \omega_1 t + I_2 \sin \omega_2 t$ ، يحتوي ترددين ، ينتج قدرة خرج كما يلي :

$$\begin{aligned} P = P_{DC} &+ 0.5a_2\ (I_1^2 + I_2^2) + a_1\ (I_1 \sin \omega_1 t + I_2 \sin \omega_2 t) \\ &- 0.5a_2\ (I_1^2 \cos 2\omega_1 t + I_2^2 \cos 2\omega_2 t) \\ &+ a_2 I_1 I_2 [\cos (\omega_1 - \omega_2) t - \cos (\omega_1 + \omega_2) t] \end{aligned} \qquad (14\text{-}10)$$

بالإضافة إلى التوافقيات يحتوي طيف القدرة مجموعات من ترددات الدخل (وهي المجموع والفرق في مثالنا هذا) . وتبين هذه المجموعات تشوه تعديل ضمني .

إن المنبع الضوئي يسبب معظم اللا خطية في نظام ليفي وذلك لأن المكاشيف الضوئية ذات خطية جيدة جداً وانه يمكن تصميم دارات إرسال واستقبال ترانزستوري خطية تماماً .

التعديل الرقمي Digital Modulation

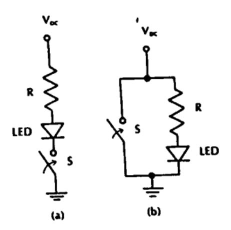
لا تحتاج دارات الـ LED الرقمية تيارات انحياز مستمرة كما هو الحال في دارات التعديل التماثلي . تحول الدارة الرقمية ببساطة ثنائي الـ LED بين وصل (ON) وقطع (OFF) . في حالة القطع يجب ان يكون اصدار الـ LED منخفضا فيولد نسبة وصل إلى قطع كبيرة . من المرغوب به ألا يعتمد التيار القائد ، في

حالة الوصل ، على مقدار إشارة الدخل . وستكون قدرة الدخل حينئذٍ ذاتها لكل نبضة حتى لو تغيرت إلى حد ما إشارات الدخل المتعاقبة .

تبين الدارات في الشكل (10 ـ 4) فكرتين لتحقيق المتطلبات السابقة . فمن أجل الدارة التسلسلية يمنع فتح المفتاح مرور التيار فيفصل الـ LED . وبإغلاق المفتاح ينتج تيار يساوي :

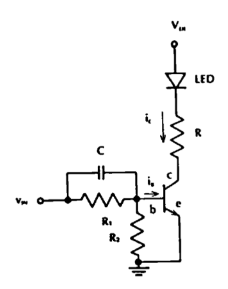
$$I = \frac{V_{DC} - v_d}{R} \qquad (15\text{-}10)$$

حيث v_d هو هبوط الجهد الأمامي للثنائي . تحدد المقاومة R وجهد التغذية تيار الثنائي . ولا يتأثر اتساع التيار بافتراض مفتاح مثالي (مفتاح ذو مقاومة مهملة وبالتالي هبوط جهد مهمل عندما يغلق) . تعمل المقاومة كمحدد فتحمي الثنائي من التيارات الزائدة . يعمل المعدِّل ذو مفتاح التوازي في الشكل (b-4-10) بشكل مماثل للدارة التسلسلية . يؤدي اغلاق المفتاح إلى فصل الثنائي وذلك بتجاوز التيار إلى الأرض . ان فتح المفتاح يؤدي إلى مرور التيار كله خلال الفرع الذي يحتوي الـ LED فينقله إلى حالة التوصيل .



شكل (10 ـ 4) ـ معدِّلات رقمية ذات مفتاح على التسلسل (a) ومفتاح على التوازي (b) .

في الدارات العملية تقدم الترانزستورات غالباً آلية التبديل . يبين الشكل (10 ـ 5) دارة تعديل بمفتاح تسلسلي ترانزستوري . تبين منحنيات خواص

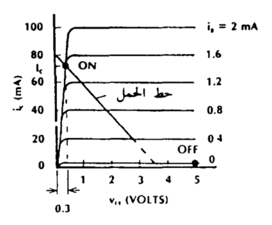


شكل (10 ـ 5) ـ معدِّل رقمي LED بمفتاح ترانزستوري .

الترانزستور في الشكل (10 ـ 6) ان تيار المجمع يكون صغيراً عندما يكون تيار القاعدة صفراً (وهذا يطابق مفتاحاً مفتوحاً) ويكون تيار (المجمع ـ الباعث) صغيراً ($\leqslant 0.3$ V) عندما يكون تيار القاعدة كبيراً (يطابق هذا الشرط مفتاحاً مغلقاً) . ويساوي التيار في حالة التوصيل ما يلي :

$$I_C = \frac{V_{DC} - v_d - 0.3}{R} \qquad (16\text{-}10)$$

ان هذا قريب من النتيجة المثالية في المعادلة (10 ـ 15) لا يقوم الترانزستور بالتبديل فقط وإنما يقدم عملية تكبير أيضاً . فيتحكم تيار دخل صغير (بحدود 1 mA) بتيار أكبر (من 50 mA إلى 100 mA) يتطلبه الـ LED . يتم اختيار R_1 و R_2 في الشكل (10 ـ 5) من أجل مواءمة ممانعة منبع الإشارة مع الترانزستور . ويزيد مكثف الدخل C سرعة الدارة إذا احتاج الأمر ذلك . يمكن ان يعمل هذا المعدِّل حتى 30 MHz .



شكل (10 ـ 6) ـ خواص مفتاح ترانزستوري .

مثال :

احسب تيار الثنائي في معدِّل بمفتاح تسلسلي عندما يكون موصلاً تماماً وكذلك تيار القاعدة المطلوب لتحقيق هذا الشرط . استعمل خواص الترانزستور في الشكل (10 ـ 6) . وليكن : $V_{DC}=5\ V$ و $R=45\ \Omega$. ان هبوط جهد الانحياز الأمامي لثنائي الـ LED يساوي 1.4 V .

الحل :

يساعد رسم خط الحمل في حل هذا المثال . وتكون معادلة خط الحمل كما يلي :

$$i_C R + V_{CE} + V_d = V_{DC} \qquad (17\text{-}10)$$

وعندما تكون $V_{CE}=0$ ينتج : $i_C=80\ mA$ وعندما تكون $i_C=0$ ينتج : $V_{CE}=3.6\ V$. وبتوصيل هاتين النقطتين ينتج خط الحمل المرسوم في الشكل (10 ـ 6) . يحدد هذا الخط بشكل صحيح نقطة العمل ما عدا عند سويات التيار المنخفضة حيث يهبط جهد الثنائي (الذي اعتبرناه مساوياً 1.4 V) إلى الصفر . وعندما يكون تيار القاعدة صفراً (حالة القطع) يكون تيار المجمع مساوياً الصفر تقريباً ويظهر جهد المنبع كلياً على الترانزستور . وتحت هذا الشرط

يكون $V_{CE}=V_{DC}=5\ V$ كما يشيـر إليه الشكل (10 ـ 6) . في حالة التوصيل يجب ان يكون تيار القاعدة كبيراً لدرجة ان تغيرات طفيفة في اتساع إشارة الدخل سوف لن تؤثر على تيار المجمع . يبين الشكل (10 ـ 6) أن هذا الشرط يحدث إذا كان $i_B \geqslant 1.6\ mA$. فيتشبع تيار المجمع (أي لا يتزايد بتزايد تيار القاعدة) من أجل تيارات قاعدة تحقق هذا الشرط . ويساوي تيار المجمع في حالة التوصيل المحسوب من المعادلة (10 ـ 16) ما يلي :

$$I_C = \frac{5 - 1.4 - 0.3}{45} = 73\ mA$$

وسيبقى التيار القائد (والقدرة البصرية) عند القيمة ذاتها من أجل جميع نبضات الدخل طالما أن $i_B \geqslant 1.6\ mA$.

(10 ـ 2) ـ تعديل الثنائي الليزري وداراته
Laser-Diode Modulation and Circuits

تبدي الثنائيات الليزرية مشاكل أكثر لمصمم الدارة مما تبديه ثنائيات الـ LED وذلك للأسباب الآتية :

1 ـ وجود تيار عتبة (Threshold Current) .
2 ـ اعتماد تيار العتبة على التقادم .
3 ـ اعتماد تيار العتبة على درجة الحرارة .
4 ـ اعتماد طول موجة البث على درجة الحرارة .

وعلى العموم فان الأنظمة الرقمية تعمل تحت العتبة مباشرة في حالة القطع (OFF) . ويكون التيار المستمر : $I_{DC} \approx I_{TH}$ كما يبينه الشكل (6 ـ 23) . ان العمل قرب العتبة (بدلاً من العمل عند تيار يساوي الصفر) ينقص حتى الحد الأدنى من تأخر التبديل إلى حالة الوصـــل . تحتاج الأنظمة التماثلية إلى تيار انحياز بالإضافة إلى تيار عتبة من أجل انجاز عمل خطي كما أشير إليه في الشكل (6 ـ 24) . ان التزايد في تيار العتبة نتيجة تقدم العمر أو ارتفاع درجة الحرارة يسبب تناقصاً في قدرة الخرج إذا بقي التيار ثابتاً .

تبلغ تغيرات طول موجة الحامل حوالي 0.2 nm/°C . ففي بعض التطبيقات يكون الانزياح غير مهم بينما يكون مهماً جداً في تطبيقات أخرى . ومن أجل وصلات تعمل قرب طول موجة التشتيت الدنيا (minimum dispersion wavelength) يؤدي الانزياح بعيداً عن طول الموجة الأمثل إلى تناقص عرض نطاق النظام . تتطلب الأنظمة المجمّعة وفق طول الموجة أيضاً درجة عالية من ثبات طول موجة الحامل وذلك للإنقاص حتى الحد الأدنى من التداخل بن الأقنية المتجاورة .

ان اعتماد طول الموجة على درجة حرارة الليزر يمكن التغلب عليه بتبريد الثنائي وذلك بطريقة الطرح الحراري وبالتبريد الكهروحراري (الموصوف بإيجاز في الفقرة 6 ـ 5) . يمكن تصحيح تغيرات في خواص الليزر الناتجة عن درجة الحرارة أو التقادم . وعلى أي حال ، ان هذا الحل الأخير الذي يتم آلياً بواسطة التحكم بواسطة التغذية الراجعة لا يحل مشكلة إزاحة طول الموجة الذي يعتمد على درجة الحرارة .

تبين الدارات التالية التقنيات الأساسية للتعديل الرقمي والتماثلي بثنائيات ليزرية . ومع أنها لا تحتوي تعقيدات التحكم بواسطة التغذية الراجعة فهي عملية عندما تكون درجة الحرارة وتُقدم العمر ليسا مهمين . وغالباً هذا هو الحال . مثلاً : في الاختبارات المخبرية لا يكون تقدم العمر مؤثراً ويمكن للعامل أن يراقب خرج الليزر وينظم تيار القيادة يدوياً للمحافظة على سوية القدرة المرغوبة . وأخيراً يمكن ان تكون هذه الدارات أجزاء المعدِّل لشبكات معقدة تحتوي تحكماً بواسطة التغذية الراجعة .

التعديل التماثلي Analog Modulation

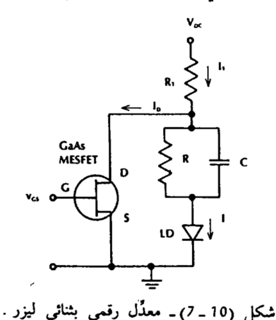
إن الدارة المبينة في الشكل (10 ـ 2) (التي وضعناها سابقاً من أجل التعديل بثنائي LED تناسب التعديل التماثلي بثنائي ليزري . وجدنا في الفقرة السابقة أن الترانزستور قدم تياراً مستمراً قيمته 31 mA . تحتاج ثنائيات الليزر عادة تيارات أكبر . يجب ان يكون لثنائي LD نموذجي تيار عتبة قيمته 75 mA

ويتطلب تيار انحياز يزيد بمقدار 25 mA عن تيار العتبة . وهكذا نحتاج إلى تيار مستمر كلي قيمته 100 mA . يمكن تقديم التيار الإضافي بواسطة منبع تيار مستمر عالي الممانعة موصل مباشرة إلى الثنائي (عند طرف مجمع الترانزستور في الشكل 10 ـ 2) . ان وجود ملف على التسلسل مع هذا المنبع يفصل دارات التيار المتناوب عن دارات التيار المستمر .

وكما هو الحال في الأنظمة بثنائيات الـ LED يجب ان نأخذ بعين الاعتبار موضوع الخطية من أجل وصلات تماثلية عالية الجودة بثنائيات ليزرية . يؤدي تسخين الوصلة إلى انحراف عن الخطية فوق العتبة في خواص (التيار ـ القدرة) . يمكن ان نتوقع تشوهات بمقدار 30 dB أو أكثر تحت سوية الإشارة من ثنائيات ليزرية جيدة .

التعديل الرقمي Digital Modulation

تناسب الدارة في الشكل (10 ـ 7) التي تستعمل Ga As MESFET بقناة n التعديل الرقمي عالي السرعة . ويمكن تحقيق معدلات أفضل من 1 Gbps . إن الدارة المبينة هي مثال لمعدِّل بمفتاح توازي . يتحكم جهد البوابة V_{GS} (سواء صفر أو سالب) بتدفق التيار في الدارة . وعندما يكون V_{GS} صغيراً تكون مقاومة



شكل (10 ـ 7) ـ معدِّل رقمي بثنائي ليزر .

قناة (المصرف ـ المنبع) للترانزستور صغيرة بينما ينتج جهد بوابة سالب كبير مقاومة قناة كبيرة . في حالة القطع للمعدِّل يكون جهد البوابة صغيراً فيسمح لجزء من التيار في المقاومة R_1 ان يتجاوز الفرع الذي يحتوي ثنائي الليزر ويتدفق خلال الترانزستور . يُغيّر جهد البوابة بحيث يكون تيار الثنائي عند قيمة عتبته . وبتطبيق جهد بوابة متزايد (أكثر سالبية) يتبدل الليزر إلى حالة التوصيل . ويمر معظم التيار خلال الثنائي بسبب المقاومة العالية التي يبديها الترانزستور .

ان جهد الثنائي (وهو عادة أقل من 2 V) يكون أصغر من جهد (المصرف ـ المنبع) V_{DS} المطلوب لعمل الترانزستور MESFET . تؤمن المقاومة R الموصولة على التسلسل مع الثنائي قيمة V_{DS} كبيرة بما يكفي في كلتا الحالتين، حالة الوصـــل (ON) وحالة القطع (OFF) . يحسن المكثف C سرعة تبديل الدارة .

ان اللا خطية في خواص الثنائي الليزري ليست بذات أهمية في المعدِّلات الرقمية . وعلى أي حال يجب ان تضمن دارة التعديل ان تيار الثنائي (وبالتالي القدرة البصرية المرسلة) هي ذاتها من أجل كل نبضة توصيل . وتحقق الدارة في الشكل (10 ـ 7) هذا الأمر . عندما تكون V_{GS} كبيرة يكون تيار المصرف I_D صغيراً لدرجة انه لايؤثر على قيمة تيار الليزر I . ويمر تقريباً كل التيار الذي يقدمه المنبع V_{DS} خلال الثنائي . وتحت هذه الشروط يحدد جهد المنبع والمقاومتان R_1 و R تيار الليزر . أي ان تيار توصيل الثنائي لا يعتمد على جهد الإشارة V_{GS} طالما ان هذا الجهد يقع فوق سوية دنيا محددة .

(10 ـ 3) ـ صيغ التعديل التماثلي

Analog Modulation Formats

بحثنا في الفقرة (10 ـ 1) النوع الأبسط لتعديل تماثلي ، إرسال تغيرات تيار جيبي وحيد . ويوضح التحليل إرسال نطاق أساسي بصري حيث تحمَّل الإشارة على حزمة ضوئية معدَّلة عند ترددات النطاق الأساسي للمعلومات . مثلاً : ان وصلة اتصالات بصرية للنطاق الأساسي تحمل قناة صوتية وحيدة

ستحتوي ترددات تعديل تتراوح من بضعة عشرات الهرتز حتى 4 kHz . وحيث ان القدرة البصرية تتغير طرداً مع تيار الدخل يستعمل عندئذٍ المصطلح ـ تعديل الشدة IM (Intensity Modulation) . يختلف تعديل الشدة عن تعديل الاتساع AM (Amplitude Modulation) الذي يشيع استخدامه في حوامل التردد الراديوي . في الـ AM يتغير اتساع الحامل (بدلاً من قدرته) بما يتناسب مع شكل موجة المعلومات . تستعمل معظم الأنظمة الليفية دائماً شكلاً ما من تعديلُ الشدة . أما التعديل الترددي للمنبع الضوئي فانه سيناقش في الفقرة (10 ـ 5) .

توجد صيغ تماثلية على نحو مختلف عن تعديل الشدة IM ذات النطاق الأساسي . وبغرض المقارنة ولكي نبسط ملاحظتنا سنكتب أولاً المعادلتين (10 ـ 1) و (10 ـ 2) من جديد كما يلي :

$$i = I_o + I_s \cos \omega_m t \qquad (18\text{-}10)$$

$$P = P_o + P_s \cos \omega_m t \qquad (19\text{-}10)$$

حيث I_o هو التيار المستمر الكلي و ω_m هو تردد التعديل و P_o هي القدرة البصرية المتوسطة . يطبق هذان التعبيران على كل من الثنائيات الليزرية وثنائيات الـ LED مثل كل المعادلات في هذه الفقرة . وفي جميع الحالات يضع التيار I_o نقطة العمل في المكان المناسب على طول الجزء الخطي من خواص (التيار ـ القدرة) للمنبع .

تعديل AM/IM لحامل فرعي AM/IM Subcarrier Modulation

يضع التعديل الاتساعي التقليدي الرسالة على حامل ذي تردد أكبر بكثير من أي من الترددات التي يحتويها نطاق الأساس . ويكون لشكل الموجة الناتجة طيف يحيط بالتردد الحامل . ففي جوهر الأمر يزيح التعديل الاتساعي AM نطاق الأساس إلى منطقة جديدة من الطيف الكهرمغناطيسي . تبث محطات الراديو ذات التعديل الاتساعي عند ترددات حامل مختلفة . وهكذا يمكن

استقبالها افرادياً باستعمال مراشيح مولَّفة على الحامل المخصص . وبعد الاستقبال ترجع الإشارات المشكلة الكترونياً إلى ترددات نطاق الأساس الأصلية .

يمكن كتابة معادلة التعديل الاتساعي لإشارة جيبية وحيدة كما يلي :

$$i = I_s (1 + m \cos \omega_m t) \cos \omega_{sc} t \qquad (20\text{-}10)$$

حيث ω_{sc} هو التردد الحامل ونجعل : $m \leqslant 1$ (وذلك من أجل المحافظة على إشارة غير مشوَّهة) . وتكون $m=1$ من أجل تعديل ٪100 . يبين الشكل (10 ـ 8) طيف هذه الإشارة . يمكن ان نضيف تياراً مستمراً I_o إلى التيار في المعادلة

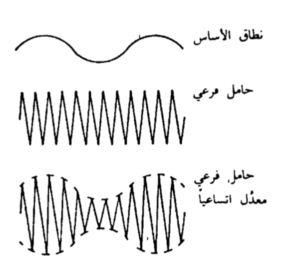


شكل (10 ـ 8) ـ طيف موجة معدلَّة اتساعياً .

(10 ـ 20) ونقود منبعاً بصرياً بالتيار الناتج فينتج تعديل شدة لحزمة ضوئية بواسطة إشارة معدّلة اتساعياً . وهذا هو التعديل AM/IM . يبين الشكل (10 ـ 9) أشكال الموجة فيولد التعديل AM/IM عندئذٍ قدرة بصرية من الشكل التالي :ـ

$$P = P_o + P_s (1 + m \cos \omega_m t) \cos \omega_{sc} t \qquad (21\text{-}10)$$

يتذبذب تردد الحامل البصري بسرعة كبيرة بينما يكون الحامل الفرعي ذو التردد الراديوي أبطأ وتردد موجة المعلومات أكثر بطأً . ويكون للتيار المكشوف الذي يتناسب مع القدرة البصرية الشكل ذاته كما للمعادلة (10 ـ 12) . أي ان التيار المكشوف لا يزال ضمن صيغة الـ AM . وتقوم دارة الاستقبال باستخلاص المعلومات من هذا التيار .



شكل (10 ـ 9) ـ أمواج AM . للقدرة البصرية وللتيار المكشوف شكل الموجة ذاته الذي للحامل الفرعي المعدَّل .

تجميع التقسيم الترددي Frequency-Division Mutliplexing (FDM)

باستعمال تعديل الحامل الفرعي يمكن إرسال عدة رسائل معاً على الليف . وكل رسالة يجب ان تعدِّل حاملاً فرعياً مختلفاً ويجب ان يكون كل حامل بعيداً عن الآخر بحيث لا تتراكب أطياف الأقنية المتجاورة لان الأطياف المتراكبة تنتج لغطاً (crosstalk) . وبالإشارة إلى الشكل (10 ـ 8) نرى بأن كل قناة تشغل عرض نطاق مساوٍ إلى ضعفي أعلى تردد تعديل ويقع نصف النطاق فوق الحامل الفرعي ونصفه الآخر تحته . ولذلك فان الحوامل الفرعية التي تتباعد عن بعضها بمقدار ضعفي تردد التعديل الأعظمي المتوقع ستمنع التراكب . تنفصل الأقنية المختلفة للمعلومات عن بعضها عند المستقبل (بواسطة مراشيح) بعد الكشف الضوئي . هناك حد بطبيعة الحال لعدد الأقنية المضافة . ويمكن إضافة حوامل فرعية جديدة فقط إذا كانت تردداتها أصغر من عرض نطاق الليف .

ان إرسال عدة رسائل بآن واحد باستعمال حوامل تردد راديوي مختلفة هو تجميع التقسيم الترددي (FDM) . يختلف الـ FDM عن تجميع التقسيم المؤسس

على طول الموجة الموصوف في الفقرة (9 ـ 5) حيث تستعمل حوامل بصرية مختلفة للتمييز بين الأقنية . ان كلاً من خطط التجميع هذه تزيد عدد الرسائل المرسلة . وفي الواقع يمكن توحيد التقنيتين . وسيحتوي النظام الناتج عدة منابع يبث كل منها عند طول موجة مختلف وكل شدة تعدِّل بتيار معدَّل بتجميع التقسيم الترددي .

يرافق الـ FDM عدة مشاكل حيث تؤدي اللا خطية التي لا يمكن تجنبها في خواص (التيار ـ القدرة) للمنبع إلى اقتران (لغط) بين الأقنية . وكذلك فان اللا خطية في مكان آخر في النظام (مثل دارة الإرسال والمكشاف الضوئي ودارة الاستقبال) يجب تقييمها أيضاً وتخفيضها حتى الحد الأدنى لإنقاص تشويه اللغط . وأكثر من ذلك إذا كانت عدة أقنية تعدِّل منبعاً فان التيار العائد لكل قناة يجب ان يكون صغيراً بحيث ان التيار الكلي لا يقود الباعث إلى أبعد من مداه الخطي . يجب ان يضمن مصمم الدارة ان تيار الذروة المتوقع ، عند توحيد عدة أقنية ، يبقى أقل من الحد المقدَّر للمنبع الضوئي وإلا فان المنبع قد يتلف . ان تنقيص التيار القائد في كل قناة يخفض كمية القدرة المرسلة الحاوية كل منها على الرسائل المرغوبة . وستتدنى نوعية الإشارة بقدر تخفيض القدرة المرسلة في كل قناة تماماً كما تتدنى نتيجة ما تحدثه الخسارات في القوارن والموصلات والليف أو أي مكونات أخرى .

تعديل FM/IM لحامل فرعي FM/IM Subcarrier Modulation

في أنظمة التعديل الترددي (Frequency Modulation) التقليدية (FM) العاملة عند الترددات الراديوية يتم احتواء المعلومات المرسلة في طور موجة الحامل . يمكن التعبير عن التيار بصورة عامة كما يلي :

$$i = I_s \cos [\omega_{sc} t + \Theta (t)] \qquad (22\text{-}10)$$

حيث توجد الرسالة في التغير الزمني لزاوية الطور Θ . إذا كان التعديل لإشارة جيبية وحيدة تتذبذب عند تردد $f_m = \omega_m / 2\pi$ فان تيار الـ FM يأخذ الشكل التالي :

$$i = I_s \cos(\omega_{sc} t + \beta \sin \omega_m t) \qquad (23\text{-}10)$$

حيث β هو دليل التعديل (Modulation Index) . يُشْغِل طيف إشارة الـ FM منطقة تحيط بالتردد الحامل $f_{sc}=\omega_{sc}/2\pi$ وله عرض نطاق كلي تقريبي يساوي :

$$B_T = 2\,\Delta f + 2\,B \qquad (24\text{-}10)$$

في هذا التعبير ، B هو عرض نطاق النطاق الأساس (ويساوي f_m للإشارة الجيبية الوحيدة) و Δf هو الانحراف الترددي الأعظمي ويعطى بالعلاقة التالية :

$$\Delta f = \beta f_m \qquad (25\text{-}10)$$

حيث f_m هو أعلى تردد تعديل في الرسالة . وعادة يكون عرض نطاق النطاق الأساس مساوياً إلى أعلى تردد تعديل أي :

$$B_T = 2 f_m (1 + \beta) \qquad (26\text{-}10)$$

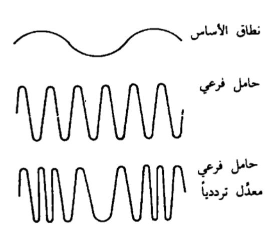
من أجل قيم صغيرة من دليل التعديل (β<<1) يكون عرض نطاق النظام الكلي فقط $2f_m$ مثل عرض النطاق لنظام AM . ومن أجل قيم من β أكبر ، على أي حال ، يتجاوز الطيف FM ذلك الخاص بقناة AM مماثلة . وحيث ان دليل التعديل يمكن ان يكون أكبر بكثير من الواحد فان طيف الـ FM يمكن ان يتجاوز كثيراً ذلك المطلوب لأجل الـ AM وبإضافة تيار مستمر إلى أي من المعادلتين (10 ـ 22) أو (10 ـ 23) وباستخدام النتيجة لاجراء تعديل شدة لمنبع بصري ينتج تعديل FM/IM لحامل فرعي . وتتغير القدرة البصرية من أجل موجة جيبية وحيدة كما يلي :

$$P = P_o + P_s \cos(\omega_{sc} t + \beta \sin \omega_m t) \qquad (27\text{-}10)$$

يبين الشكل (10 ـ 10) أمواج FM حيث يكون للتيار المكشوف نفس شكل القدرة البصرية . تسترجع دارات إزالة التعديل (Demodulation) التقليدية المعلومات التي يحتويها طور التيار المكشوف .

يمكن إرسال عدة أقنية FM سويةً بواسطة تجميع التقسيم الترددي تماماً كما وصفناه للتعديل الاتساعي للحامل الفرعي . وعلى أي حال وحيث ان عرض

نطاق الـ FM أكبر من عرض نطاق الـ AM فان عدداً أقل من رسائل الـ FM يمكن أن تكيَّف ضمن المدى المحدود من الترددات لليف . يجب انْ تفصل الحوامل الفرعية للتعديل الترددي عن بعضها بعرض النطاق B_T الوارد في المعادلة (10 ـ 26) .



شكل (10 ـ 10) ـ أمواج FM للحامل الفرعي . للقدرة البصرية وللتيار المكشوف نفس شكل الموجة كما للحامل الفرعي المعدّل .

(10 ـ 4) ـ صيغ التعديل الرقمي
Digital Modulation Formats

لاحظنا في الفقرة (2 ـ 1) كيف يمكن ترميز الرسائل التماثلية من أجل الإرسال الرقمي . وقد بينا في مثال أن اعتيان وترميز رسالة صوتية بتردد 4 kHz قد انتج تدفقاً نبضياً بمقدار 64 kbps . وان نظاماً ليفياً يحتاج لعرض نطاق مقداره 4 kHz فقط من أجل إرسال صوت نطاق أساس تماثلي . ووفقاً للمعادلة التي تسبق المعادلة (3 ـ 20) يتطلب قطار نبضي RZ عرض نطاق كهربائي مساوٍ إلى معدل المعطيات . وهكذا تحتاج إشارة 64 kbps رقمية إلى نظام ذي عرض مقداره 64 kHz . من أجل ارسال فيديوي يبلغ عرض النطاق النموذجي 6 MHz لإرسال تماثلي بنطاق أساس و 81 MHz من أجل إشارة عودة إلى الصفر (RZ) رقمية تصدر بمعدل معطيات 81 Mbps . ويبدو واضحاً ان الأنظمة الرقمية تحتاج عرض نطاق أكثر مما تحتاجه الأنظمة التماثلية .

لماذا إذن نفضل اختيار الوصلات الرقمية البصرية عن الوصلات التماثلية ؟ نورد فيما يلي بعضاً من الأسباب :

1 ـ يمكن للثنائيات الليزرية ولثنائيات الـ LED ان تتبدل بين قطع ووصل بسرعة مما يعطيها عروض حزمة كبيرة . ان للألياف وللمكاشيف الضوئية أيضاً عروض حزمة كبيرة وهكذا يمكن ان تعمل الأنظمة البصرية الليفية عند معدلات معطيات يمكن مقارنتها بتلك التي تحتاجها التطبيقات الفيديوية والتطبيقات ذات النطاق العريض الأخرى .

2 ـ تتدنى جودة الإشارات الليفية التماثلية نتيجة اللا خطية في خواص التيار ـ القدرة لثنائيات الـLED والـ LD . ويكون تأثر الإشارات الرقمية بهذه اللا خطية أقل وذلك بسبب انه يستعمل عادة سويتان فقط (أو ربما ثلاثة) من سويات القدرة وأن إحدى هذه السويات يساوي صفراً . وخلافاً لما هو في الإرسال التماثلي فلا تظهر الحاجة إلى المحافظة على شكل الموجة بدقة . يحدد جهاز الاستقبال فقط وجود النبضات في كل فاصلة بتّة وليس شكل النبضة .

3 ـ يمكن ان تستعمل الأنظمة الرقمية رموز تصحيح الخطأ وإرسال معلومات زائدة لتنقيص الخطأ حتى الحد الأدنى .

4 ـ ان الوصلات البصرية الرقمية منسجمة مع الوصلات غير البصرية الرقمية . مثلاً : ان شبكة تصل معالجات ميكروية تشتمل على إشارات رقمية فقط . ويمكن ان ترتبط الشبكة مع مجموعة من الوصلات الليفية والسلكية . في هذا المثال يكون الإرسال الرقمي فقط ذا معنى . وفي أي تطبيق حيث تتولد المعطيات بالشكل الرقمي تفضل الوصلة الرقمية عن الوصلة التماثلية .

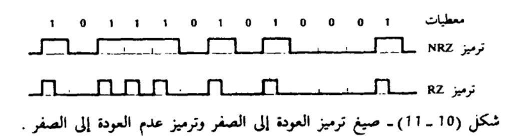
5 ـ يمكن إعادة توليد النبضات الرقمية بسهولة عند المكررات . فتقوم المكررات الرقمية بإعادة تشكيل النبضات الواردة وتكبيرها فتتغلب بالتالي على كل من التخامد والتشوه . يمكن إنشاء وصلات ليفية طويلة جداً (بطول عشرات أو حتى مئات الكيلومترات) باستعمال المكررات . ويمكن تكبير الإشارات التماثلية بواسطة المكررات إلا انه ليس من السهل استرجاع أشكال موجاتها . فمن أجل أنظمة طويلة تتطلب مكررات يفضل كثيراً الإرسال الرقمي .

6 ـ وبصورة عامة تنتج الأنظمة الرقمية إشارات أجود مما تنتجه الأنظمة التماثلية . وبحسب الرغبة يمكن ان يُضحى بجودة الإشارة من أجل مسارات أطول . ان الجودة المحسنة ومسارات الإرسال الأطول هما المكافأة الرئيسة لتقديم وصلة رقمية ذات عرض نطاق كبير .

في بقية هذا الفصل سنصف بضعة خطط ترميز رقمية منسجمة مع الإرسال بالألياف البصرية .

التعديل النبضي المرمَّز Pulse-Code Modulation (PCM)

ناقشنا في الفصل 3 كلا من ترميز عدم العودة إلى الصفر (NRZ) وترميز العودة إلى الصفر (RZ) . ان كلا من هاتين الصيغتيْن وحيدتي القطبية ذات السويتين المبينتين في الشكل (10 ـ 11) هما مثال للتعديل النبضي المرمّز (PCM) . عند النظر إلى هذه الصور تذكر ان أشكال الموجة المبينة تمثل القدرة المتوسطة في التذبذبات السريعة جداً لحامل بصري .



شكل (10 ـ 11) ـ صيغ ترميز العودة إلى الصفر وترميز عدم العودة إلى الصفر .

مثال :

عند طول موجة $0.82\ \mu m$ كم ذبذبة تحدث ضمن نبضة عرضها 1 n.s ؟

الحل :

يبلغ التردد : $f=c/\lambda=3.66\times10^{14}$ Hz ويبلغ الدور : $T=1/f=2.73\times10^{-15}$ s فخلال عرض نبضة مقداره 10^{-9} s يوجد عدد من الذبذبات البصرية يساوي : $10^{-9}/2.73\times10^{-15}=365853$.

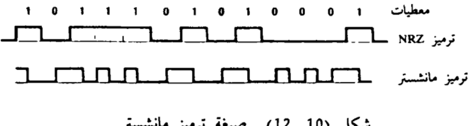
حيث أن الـ PCM البصري يتضمن تبديل الحامل بين حالتي وصل (ON) وقطع (OFF) فانه تنطبق عليه التسمية الإبراق بالوصل والقطع (ON-OFF Keying, OOK) .

يحتوي طيف قطار نبضي NRZ مركبة مستمرة مهمة وكبيرة . وتعتمد قيمته في أية فترة زمنية قصيرة على المعطيات . وتنتج سلسلة من الواحدات قيمة أكبر مما تنتجه سلسلة من الواحدات والأصفار أو تتابع من الأصفار . وفي المستقبل فان تيار الإشارة المستمر يحدد جزئياً نقطة عمل المكبرات . فسوية تيار مستمر متغيرة تغير نقطة العمل فينتج تغير غير مرغوب به (انسياق drift) في خواص المستقبل . وان من مساوىء الترميز NRZ الحاجة إلى اقتران تيار مستمر .

ومن أجل الترميز RZ يؤدي الاقتران السعوي (اقتران تيار متناوب) في دارة الاستقبال إلى حجب المركبة الطيفية للتيار المستمر فينقص بذلك الانسياق حتى الحد الأدنى . يوحي الانتقال بين السويات إلى وجود الواحدات أو الأصفار . ان الانسجام مع اقتران التيار المتناوب هي ميزة لصيغ الـ RZ بالنسبة لصيغ الـ NRZ . وبطبيعة الحال كما لاحظنا عند مقارنتنا المعادلتين (3 ـ 20) و (3 ـ 21) أن وصلة ليفية بانبساط نبضة ثابت (وبالتالي عرض نطاق ثابت) يمكن ان ترسل إشارات NRZ بمعدل يساوي ضعفي معدل إشارات RZ . وبمعنى آخر من أجل معدل معطيات ثابت تتطلب صيغة الـ RZ ضعفي عرض نطاق الإرسال الذي تتطلبه صيغة الـ NRZ . وفي هذه الحالة تتميز صيغة الـ NRZ .

وفي أمثلة عديدة يجب ان يعرف المستقبل معدَّل وصول بتّات المعطيات إليه وهذا هو معدل الميقاتية (clock rate) . في الترميز NRZ يكشف تتابع من الأصفار والواحدات المتناوبة معدل الميقاتية بينما يحجب تعاقب واحدات فقط أو تعاقب أصفار فقط ذلك المعدل . في الترميز RZ يمكن قياس معدل الميقاتية عندما يظهر تعاقب من الواحدات وليس عندما يحدث أي نمط معطيات آخر .

يمكن استخلاص معدل الميقاتية من قطار المعطيات باستعمال مخطط ترميز مانشستر الذي يبينه الشكل (10 ـ 12) . في هذه الصيغة تنعكس قطبية



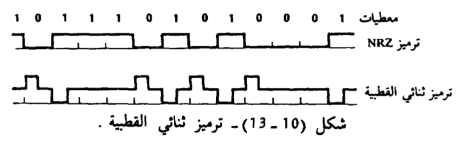
شكل (10 ـ 12) ـ صيغة ترميز مانشستر .

الإشارة في مركز كل مسافة بتّة. ويحدد اتجاه هذا الانتقال الحالة المنطقية . ان الانتقال من السوية العالية إلى السوية المنخفضة يشير إلى الواحدات والانتقال من السوية المنخفضة إلى السوية العالية يشير إلى الأصفار . تسمح الانتقالات العديدة للمستقبل بكشف معدّل الميقاتية بغض النظر عن توزيع الواحدات والأصفار في المعطيات . وحيث ان المعطيات تحتويها الانتقالات بين السويات فان اقتران التيار المتناوب هو المناسب . ومن أجل ان نوجز نقول ان ترميز مانشستر يقدم فائدة استرجاع معدل الميقاتية وقرن التيار المتناوب وان متطلبات عرض نطاقه هي ذات متطلبات حالة الـ RZ وضعفي ما تحتاجه حالة الـ NRZ .

إذا كان استرجاع معدل الميقاتية ليس مهماً فان ترميز RZ باقتران تيار متناوب يمكن ان يكون هو الخيار الأفضل . تبدي هذه الصيغة مشكلة على أي حال إذا كانت دارة الاستقبال تحتوي على تحكم آلي بالربح AGC (Automatic Gain Control) . إذا حدث تدفق من الأصفار فان دارة الـ AGC تزيد الربح . في هذه الحالة فان الواحد المنطقي التالي الذي يظهر سيكبّر أكثر بكثير مما هو مرغوب به . وعلى العموم ستكبّر كل نبضة بمقدار يحدده تدفق المعطيات التي تسبقها . ان هذه العملية غير المستقرة تجعل من الصعب للمستقبل ان يميز بشكل صحيح بتّات المعطيات .

ان الترميز ثنائي القطبية وهو المخطط ذو الثلاث سويات المبين في الشكل (10 ـ 13) يحل مشكلة الاستقرار . يقدم هذا الترميز نبضة حينما تتغير المعطيات . في المثال المبين في الشكل يتحول المرسل إلى القدرة الكاملة من أجل نصف مسافة بتّة عندما يتلو صفرٌ واحداً . ويعود حينئذٍ إلى سوية نصف القدرة

ويبقى عندها حتى يظهر واحد فتهبط عندها القدرة إلى الصفر من أجل نصف فترة بتة . وتعود عندئذٍ القدرة ثانية إلى السوية المتوسطة . يرسل هذا الترميز فقط التغيرات في تدفق معطيات الـ NRZ فهو مرمِّز حافي (edge encoder) . يبين الشكل بوضوح أن سوية القدرة المستمرة (المتوسطة) سوف لن تتغير بغض النظر عن نمط المعطيات . تحدث هذه الخاصة لأن النبضات العالية والمنخفضة تتناوب دائماً . فينتج عمل مستقر ، حتى مع مستقبل ذي AGC ، بسبب المحافظة على سوية مرجعية ثابتة .



شكل (10 ـ 13) ـ ترميز ثنائي القطبية .

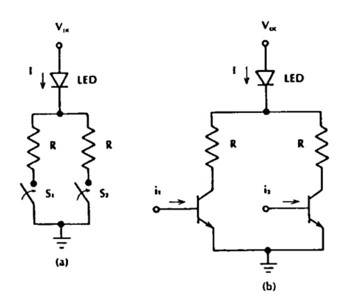
ومع ان المرسل ثنائي القطبية يملك ثلاثة سويات فانه لا يزال يكوِّن نظاماً ثنائياً حيث تصل الأصفار والواحدات فقط إلى المستقبل .

يبين الشكل (a-14-10) خطة لتصميم مرسل بثلاثة سويات . وعندما يكون كلا المفتاحين مفتوحاً لا يمر تيار في الدارة فينتج السوية الأولى من قدرة الصفر . يؤدي اغلاق المفتاح S_1 إلى تدفق تيار الثنائي LED وفق ما يلي :

$$I = \frac{V_{DC} - v_d}{R} \qquad (28\text{-}10)$$

حيث v_d هو جهد الثنائي عندما يكون منحازاً أمامياً . ان هذا التيار الذي يبلغ عادة نصف القيمة العظمى المسموح بها يقدم السوية الثانية عند نصف القدرة البصرية العظمى . ويؤدي اغلاق كلا المفتاحين إلى تغيير المقاومة الكلية المربوطة على التسلسل مع الثنائي LED إلى R/2 فيتضاعف تقريباً تيار السوية الثانية . ويبث الثنائي الآن القدرة العظمى فتتولد السوية الثالثة .

يمكن تحقيق الدارة المبينة في الشكل (a-14-10) باستعمال مفتاحين ترانزستوريين كما يبينه الشكل (b-14-10) . يكون الترانزستوران في حالة قطع



شكل (10 ـ 14) ـ انتاج خرج LED ذي ثلاث سويات . (a) ـ الفكرة النظرية و (b) ـ التحقيق العملي للدارة .

(off) ، وهذا ما يطابق وضع المفتاح المفتوح ، عندما يكون تيار القاعدة لكل منهما (i_1 و i_2) صفراً ويكونا في حالة وصل (on) ، (أي وضع المفتاح المغلق) ، عندما يكون كل من i_1 و i_2 موجباً . وكما وُصف في الفقرة (10 ـ 1) تعتمد حالة المفتاح الترانزستوري (مفتوح أو مغلق) على تيار قاعدة الدخل . وبالأخذ بعين الاعتبار هبوط الجهد الصغير ($V_{CE} \approx 0.3$ V) عبر الترانزستور عندما يكون في حالة الاغلاق يصبح تيار الثنائي عند السوية الثانية كما يلي :

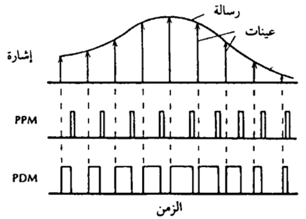
$$I = \frac{V_{DC} - V_d - V_{CE}}{R} \qquad (29\text{-}10)$$

يمكن إضافة تيار انحياز أولي إلى الدارة ذات السويات الثلاثة بوضع مقاومة على التوازي مع الفرعين المفتاحين . عندما يكون كلا المفتاحين مفتوحين سيمر كمية من التيار في الثنائي تعتمد على قيمة المقاومة المضافة . يمكن ان يحل ثنائي ليزري مكان ثنائي LED في الشكل (10 ـ 14) حيث يستعمل انحياز أولي لوضع تيار السوية الأولى عند العتبة .

صيغ رقمية أخرى Other Digital Formats

بالإضافة إلى نظم الترميز التي قدمت فإنه يمكن تحقيق المشاريع الرقمية الأخرى التي شاعت في أنظمة الاتصالات الكهربائية بواسطة وصلات بصرية ليفية . سنصف بإيجاز بعضاً منها .

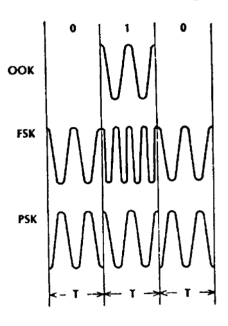
فيما يسمى تعديل موضع النبضة (Pulse Position Modulation, PPM) تقاس موجة تماثلية دورياً وترسل معلومة الاتساع لكل عينة بواسطة نبضة بصرية قصيرة وحيدة . ويكون لجميع النبضات الارتفاع ذاته بغض النظر عن قوة العينة الفردية . ان موضع النبضة ضمن الشق الزمني المحدد لها يحمل معلومات الاتساع . ويكون الشق الزمني طويلاً بالمقارنة مع دوام النبضة . ويكون تأخر النبضة بالنسبة إلى نقطة مرجعية ما في الشق الزمني متناسباً مع اتساع العينة . وليس مثل الـ PCM الذي يقرر فيه المستقبل فيما إذا حدثت نبضة في أي فترة بتّة فان الـ PPM يحدد متى تصل النبضة . يبين الشكل (10 ـ 15) تعديل موضع النبضة .



شكل (10 ـ 15) ـ تعديل موضع النبضة وتعديل دوام النبضة .

يشبه تعديل مدة النبضة (Pulse Duration Modulation, PDM) تعديل موضع النبضة . ترسل نبضة لأجل كل بتّة معلومات الا انه يتناسب مدة النبضة مع اتساع العينة . يبين الشكل (10 ـ 15) مثالاً عن قطار نبضات PDM لمقارنته مع الـ PPM .

يبين الشكل (10 ـ 16) طريقة التبديل بوصل/قطع الحامل الفرعي (OOK) وهي مستعملة أيضاً في الاتصالات الليفية حيث يقود متذبذبٌ تردد راديوي وحيد ، يخضع لحالة وصـــل (ON) عند الواحدات الثنائية ولحالة قطع (OFF) عند الأصفار ، المنبع البصري .



شكل (10 ـ 16) ـ ابراق بالوصل والقطع لحامل فرعي ، وابراق بإزاحة التردد ، وابراق بإزاحة الطور .

يبين الشكل (10 ـ 16) الابراق بانزياح التردد (Frequency-Shift Keying), (FSK) والابراق بانزياح الطور (Phase-Shift Keying, PSK) وهما صيغتان ثنائيتان تضعان أيضاً المعطيات على موجات التردد الراديوي . في الإرسال الليفي تمثل أشكال الموجة المبينة في الشكل تيار التعديل والقدرة البصرية الناتجة . أما التذبذبات المبينة فهي الحامل الفرعي ذي التردد الراديوي .

في الـ FSK يحدد تردد الحامل الفرعي الحالة المنطقية مثلاً : يطابق التردد f_1 الحالة المنطقية 1 والتردد f_2 الحالة المنطقية 0 . وفي الـ PSK يحدد طور الحامل الحالة المنطقية فقطبية موجبة تمثل الواحد وقطبية سالبة تمثل الصفر .

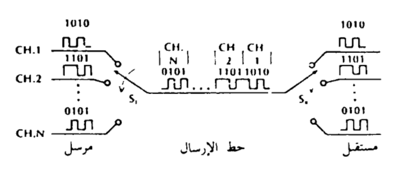
يحرك كل من الـ OOK للحامل الفرعي والـ FSK والـ PSK طيف إشارة التعديل من ترددات منخفضة إلى منطقة تحيط بالحامل الفرعي . تتضمن فوائد ترميز الحامل الفرعي رقمياً إمكانية تجميع التقسيم الترددي وهذا مشابه للمخطط الموصوف في الفقرة (10 ـ 2) لإرسال رسائل تماثلية متعددة بذات الآن .

يعتمد تعقيد كل من المرسل والمستقبل على مخطط الترميز . تتطلب على العموم الصيغ PPM و PDM و OOK للحامل الفرعي و FSK للحامل الفرعي و PSK للحامل الفرعي تصاميم أكثر تعقيداً مما يتطلبه الـ PCM . ولهذا السبب يكون الـ PCM هو الخيار الجذاب من أجل عدة أنظمة ليفية .

في بعض الحالات يفرض الانسجام مع وصلات الاتصالات الكهربائية الموجودة استعمال إحدى نظم الترميز الأخرى . وفي حالات أخرى يمكن ان يتحسن أداء النظام (مستقبل ذو أخطاء أقل وحساسية أعلى) باستخدام تجهيزات أكثر تعقيداً .

تجميع التقسيم الزمني Time-Division Multiplexing (TDM)

يسمح تجميع التقسيم الزمني لعدد من الرسائل المعالجة رقمياً أن تشترك زمنياً بنفس خط الإرسال . وليس مثل أنظمة الـ WDM حيث تنتشر الرسائل معاً في وقت واحد . يرتب الـ TDM البتّات أو مجموعات البتّات (كلمات أو أحرف) الخاصة بالرسائل المختلفة قبل إرسالها . وعند المستقبل تعكس العملية . فالنبضات التي تخص الرسائل الفردية تُفْصَل وتُسَيَّر إلى مواقعها المناسبة . يبين الشكل (10 ـ 17) الـ TDM . ومن الناحية العملية تستبدل المفاتيح الميكانيكية المبينة في الشكل بمفاتيح الكترونية أو بصرية . ففي الشكل (10 ـ 17) يقوم النظام بترتيب كلمات بأربعة بتّات تخص عدد N قناة (N رسالة) . يقوم المفتاح S_T بأخذ عينات من كل قناة تتابعياً ومن ثم يبدأ ثانية فينتج رتلاً وحيداً من عدد (N) كلمة بأربعة بتّات لكل دورة .



شكل (10 ـ 17) ـ تجميع التقسيم الزمني . المفتاحان S_1 و S_R متزامنان .

يقدم النظام الهاتفي مثالاً عملياً ممتازاً عن الـ TDM . تذكِّر الفقرة (2 ـ 1) أن رسائلاً صوتية تُعتان بمعدل 8000 مرة بالثانية وان كلمة بثمانية بتّات تمثل اتساع كل عينة . يمكن أن تصف البتّاتُ الثمانيةُ $2^8=256$ سويةً مفردةً . أي أن اتساع الموجة الصوتية يكمَّم إلى 256 سوية . ويكون معدل المعطيات لرسالة صوتية وحيدة مساوياً إلى 8 (8000)=64000 bps . وكما رأينا يمكن للألياف ان ترسل بسهولة بمعدلات أعلى بكثير . الا ان إرسال 64 kbps فقط هو قليل الفائدة . يعطي تجميع التقسيم الزمني استخداماً أفضل لعرض النطاق المتوفر لليف .

لننظر إلى نظام التجميع T1 (24 قناة) يشمل التجميع ضم 24 كلمة بثمانية بتّات فيحتوي كل رتل 192=(24) 8 بتّة رسالة . وتضاف بتّة إضافية عند جبهة كل رتل من أجل تعيين بدايته وهكذا يحتوي كل رتل في الواقع على 193 بتّة. وحيث ان معدل الأرتال يساوي معدل الاعتيان فيكون عدد الأرتال بالثانية مساوياً 8000 . ويكون معدل النبضات الكلي الذي يجب ان يرسل إذن هو 193 (8000)=1.544 Mbps . وكما حددنا سابقاً يمكن لهذا المعدل المتواضع ان يعالج بسهولة بواسطة الألياف البصرية . في الحقيقة تعمل خطوط الهاتف الليفية TDM في الغالب عند معدلات أعلى مثل T3 (44.7 Mbps) و T3C (91 Mbps) بل وأكثر من ذلك .

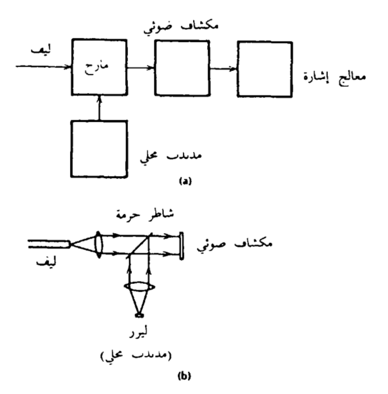
(10 ـ 5) ـ المستقبلات الهيتيرودايني البصرية

Optical Heterodyne Receivers

نعلم من مناقشتنا في الفصل السابع ان المكاشيف الضوئية تنتج تيارات متناسبة مع القدرة البصرية الواردة . تستجيب المكاشيف للتراوحات في شدة الضوء وهذه خاصة لا تعتمد على طور أو تردد الضوء . وهكذا فإن المكاشيف الضوئية لا تنتج من جديد التغيرات في التردد أو الطور للموجة الضوئية المتذبذبة . ولهذا السبب يكون التعديل الترددي غير فعال لمنبع بصري من أجل اتصالات تستعمل أساليب الكشف المباشر الموصوفة سابقاً . وعلى أي حال يمكن ان توجد أنظمة تعديل ترددي بصري باستعمال الكشف الهيترودايني .

الكشف الهيترودايني Heterodyne Detection

في الكشف الهيترودايني (الذي يدعى أيضاً الكشف المتماسك) تمتزج حزمة من الضوء (المتذبذب المحلي) بالموجة المعدَّلة عند مدخل المكشاف الضوئي كما



شكل (10 ـ 18) ـ الكشف الهيترودايني البصري . (a) ـ المخطط الكتلي للمستقبل و (b) ـ ضم حزمتي المتذبذب المحلي والإشارة .

يبينه الشكل (10 ـ 18) . يحول المكشاف الهيترودايني تغيرات الطور في التردد الحامل البصري إلى تغيرات طور في الشدة البصرية . وتُنتَج التغيرات الأخيرة من جديد في موجة التيار المكشوف فيمكّن ذلك من استقبال وإزالة تعديل الحوامل المعدلَّة ترددياً . ان المستقبلات الهيترودايننية فعالة أيضاً في كشف الإشارات الرقمية ذات تعديل الشدة .

يبين تحليل بسيط كيف ان المخطَط الهيترودايني يسمح بكشف التعديل . ان الحقول الكهربائية للإشارة المرسلة وحزم المتذبذب المحلي هي على التوالي :

$$E_{SIG} = E_S \cos [\omega_C t + \Theta (t)] \qquad (30\text{-}10)$$

$$E_{LO} = E_L \cos [(\omega_C + \omega_{IF}) t] \qquad (31\text{-}10)$$

حيث ω_C هو تردد الحامل البصري و $\Theta (t)$ تحتوي الرسالة المعدَّلة ترددياً . من أجل التعديل بواسطة موجة جيبية وحيدة نكتب : $\Theta(t)=\beta \sin \omega_m t$ و β هو دليل التعديل . يمكن ان تمثل المعادلة (10 ـ 30) أيضاً إشارة (OOK) . في هذه الحالة تكون Θ ثابتة ويكون لاتساع الإشارة E_S إحدى قيمتين 0 أو 1 خلال كل فترة بتّة بحسب القيمة التي كانت قد أرسلت . من أجل التعديل FSK تكون $\Theta (t)$ إما $\omega_1 t$ أو $\omega_2 t$. وينزاح تردد المتذبذب المحلي الذي يساوي $\omega_{LO}=\omega_C+\omega_{IF}$ عن تردد الحامل بمقدار التردد المتوسط ω_{IF} (Intermediate Frequency, IF) . يكون التردد (IF) عادة في مجال التردد الراديوي . ويمكن ان يبلغ عدة عشرات أو مئات من الميغاهرتز . وإذا لم يكن هناك أي انزياح أي إذا كان $\omega_{IF}=0$ يظهر ما يسمى بنظام الكشف الهومودايني .

يتناسب التيار المكشوف مع الشدة I (مربع الحقل الكهربائي الكلي) للحزمة الضوئية الواردة . وهكذا يكون :

$$I = (E_{SIG} + E_{LO})^2 \qquad (32\text{-}10)$$

وبتبديل المعادلتين (10 ـ 30) و(10 ـ 31) في هذه المعادلة ينتج ما يلي :

$$I = 0.5\, E_S^2 \left\{1+\cos [2\omega_C t + 2\, \Theta (t)]\right\} + 0.5\, E_L^2 \left\{1+\cos [2 (\omega_C+\omega_{IF})t]\right\}$$
$$+ E_L E_S \left\{\cos [\omega_{IF} t - \Theta (t)] + \cos [2\, \omega_C t + \Theta (t) + \omega_{IF} t]\right\} \qquad (33\text{-}10)$$

إن الحدود الثلاثة التي تتذبذب قرب التردد $2\omega_C$ تقع خارج استجابة الكاشف ولا تظهر في مخرجه . ومن جهة أخرى وحتى لو أعطى المكشاف الضوئي تياراً بتردد $2\omega_C$ فان السعة الشاردة الصغيرة ستكون ذات مفاعلة صغيرة بحيث ان التيار سيُقصَر إلى الأرض مباشرة من غير أن يمر خلال مقاومة الحمل . ويمكن كتابة الحدود الباقية كما يلي :

$$I = E_L^2 \left\{0.5 \left(1+ \frac{E_S^2}{E_L^2}\right) + \frac{E_S}{E_L} \cos\left[\omega_{IF} t - \Theta(t)\right]\right\} \qquad (34\text{-}10)$$

لاحظ كيف ان التقنية الهيترودواينية قد حافظت على تغير الطور $\Theta(t)$.

وبتذكرنا أن القدرة في الحزمة الضوئية تتناسب مع مربع حقلها الكهربائي نستنتج ان القدرة البصرية الكلية تكون كما يلي :

$$P = P_L \left\{0.5 \left(1 + \frac{P_S}{P_L}\right) + 0.5 \left(\frac{P_S}{P_L}\right) \cos\left[\omega_{IF} t - \Theta(t)\right]\right\} \quad (35\text{-}10)$$

حيث P_S و P_L هي القدرة في حزمة الإشارة وحزمة التذبذب المحلي على التوالي .

أما التيار $i=\eta eP/hf$ فانه يتضمن حداً مستمراً يساوي ما يلي :

$$i_{d.c.} = 0.5 \frac{\eta e}{h f} P_L \left(1 + \frac{P_S}{P_L}\right) \qquad (36\text{-}10)$$

ويحتوي حداً بتردد If ويساوي ما يلي :

$$i_{IF} = \frac{\eta e}{h f} (P_S P_L)^{0.5} \cos\left[\omega_{IF} t - \Theta(t)\right] \qquad (37\text{-}10)$$

يتم التخلص عموماً من التيار المستمر أما تيار الـ IF فانه يكبّر . تقوم حينئذٍ مزيلات التعديل FM الالكترونية التقليدية باستخلاص المعلومات التي تحتويها $\Theta(t)$. وإذا كان النظام من نوع OOK (ليس معدَّلاً ترددياً) يبقى الطور Θ و P_S هي التي تحتوي على المعلومات .

لاحظ ان تيار الـ IF الحامل للمعلومات يتزايد مع قدرة المتذبذب المحلي . في الواقع يعمل المتذبذب المحلي كمكبر إشارة مما يزيد حساسية المستقبل .

في التحليل السابق كتبنا المعادلات بافتراض باعثات ضوء وحيد اللون . ومن الناحية العملية فان ثنائيات ليزرية مستقطبة خطياً ذات الأسلوب العرضي المفرد والأسلوب الطولي المفرد تعتبر كافية .

يعتمد الكشف الهيترودايني على التداخل بين حزمتي ضوء الإشارة والمتذبذب المحلي . سوف لن تتداخل الحقول ما لم تكن مستقطبة بشكل متماثل . ويوضح هذا متطلبات الاستقطاب الخطي للمنبع . ولسوء الحظ ان معظم الألياف لا تحافظ على الحالة الاستقطابية للموجة . فخلال المسير يمكن ان يدور اتجاه الاستقطاب ويمكن ان تتغير الحالة الخطية إلى استقطاب آخر . وأيضاً يمكن ان تسبب العوامل المحيطية (الاهتزازات والانزياحات الصغيرة في درجة الحرارة) تغيرات عشوائية في حالة الاستقطاب . تتطلب الأنظمة الهيترودايينة العملية ألیافاً وحيدة الأسلوب مبنية خصيصاً للمحافظة على الاستقطاب .

ان الانزياح بين المتذبذب المحلي والمرسل يمكن ان يولَّف بدقة باستعمال خاصّةِ طول الموجة الذي يعتمد على درجة الحرارة للثنائيات الليزرية . ان ثنائيين متماثلين يعملان عند درجتي حرارة مختلفتين قليلاً . سيتذبذبان بترددين مختلفين . وفي حال البدء بالعمل يجب المحافظة على درجة حرارة ثنائي الليزر ضمن جزء صغير جداً من الدرجة لكي نحفظ التردد IF من التغير كثيراً .

مثال :

افترض ثنائياً ليزرياً ذا تغير في التردد مقداره 20 GHz/°C . ما هي تراوحات درجة الحرارة المسموح بها إذا توجب ان يكون التغير في انزياح التردد أقل من 100 MHz ؟

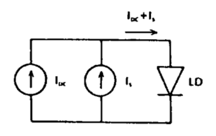
الحل :

إن مقدار التغير المسموح به هو : (0.1 GHz)/(20 GHz/°C)=0.005 °C .
وبالنسبة لنظام ذي تردد IF اسمي مساوٍ 1 GHz يمكن ان يكون تغير مقداره 100 MHz مقبولاً .

التعديل الترددي لثنائي ليزري Laser-Diode Frequency Modulation

يعتمد تردد التذبذب لثناي ليزري وحيد الأسلوب على الاتساع اللحظي للتيار المحقون . يمكن ان نشرح هذه النتيجة كما يلي : يحدد التيار كلاً من كثافة الحامل ودرجة الحرارة في الطبقة الفعالة من نصف الناقل . وبالمقابل يحدد هذان العاملان دليل انكسار الطبقة . وكما رأينا سابقاً من المعادلة (3 ـ 24) يعتمد تردد طنين التجويف على دليل إنكساره . وهكذا فان تردد الطنين (الذي هو تردد الخرج أيضاً) يتغير عندما يتغير التيار . بهذه الطريقة يُنتج تعديل تيار القيادة تعديلاً ترددياً للثنائي الباعث . يمكن ان نرى النتيجة كتعديل لدليل الانكسار .

إن دارة التعديل الترددي لثنائي ليزري المرسومة في الشكل (10 ـ 19) تبدو مشابهة جداً لدارة تعديل الشدة . يتم انحياز الثنائي بتيار متواصل في وسط المنطقة الخطية من خواص التيار ـ القدرة له . يجب أن يكون تيار التعديل المتناوب صغيراً (يمكن ان يكون فقط بضعة ميللي أمبير) حتى ينقص تعديل الشدة غير المرغوب الذي يحدث حتى الحد الأدنى . ان المحددات الالكترونية في المستقبِل تخفض تغيرات الاتساع بدرجة أكبر وذلك قبل إزالة تعديل الإشارة .



شكل (10 ـ 19) ـ تعديل ترددي لثنائي ليزري . I_s هي إشارة التعديل .

وينتج التيار المتناوب تعديلاً ترددياً للحامل البصري . ان انحراف التردد من أجل تعديل موجة جيبية وحيدة بتردد f_m هو : $\Delta f=\beta f_m$. ان انحراف التردد (أو ما يقابله وهو دليل التعديل Modulation Index β) يتغير خطياً مع اتساع الذروة للتيار المتناوب . ان انحراف تردد مقيس نموذجي للثنائيات الليزرية Al Ga As يبلغ 200 MHz/mA عند تردد تعديل 300 MHz . ولكي نوضح هذه العبارة الأخيرة نقول انه إذا كان تيار القيادة المتناوب يتذبذب عند 300 MHz فان انحراف التردد يتزايد بمقدار 200 MHz لكل زيادة مقدارها 1 mA في قيمة الذروة للتيار المتناوب .

مثال :

استعمل القيمة العددية 200 MHz/mA لانحراف التردد عند تعديل بقيمة 300 MHz من أجل حساب دليل التعديل عندما تكون قيمة الذروة للتيار المتناوب 1 mA و 5 mA .

الحل :

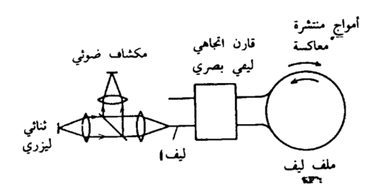
عند 1 mA يكون انحراف التردد $\Delta f=200$ MHz بينما عند 5 mA يكون : $\Delta f=1000$ MHz . باستعمال $\beta=\Delta f/F_m$ نجد أن $\beta=200/300=0.67$ عند 1 mA و $\beta=1000/300=3.33$ عند 5 mA .

ان التعديل FM البصري جذاب بسبب انسجامه مع أنظمة FM ذات التردد الأصغر (تردد الأمواج الميكروية والراديوية) . يمكن للإشارات ذات التردد المنخفض ان تعدِّل مباشرة الثنائيات الليزرية تعديلاً ترددياً من أجل الإرسال بالألياف . مثال : لنعتبر محطة راديوية FM تعمل عند 100 MHz . وكما أشير إليه في الجدول (1 ـ 4) تشغل الإشارة المعدَّلة نطاق 200 kHz . ويحيط هذا النطاق بالحامل (100 MHz) . في الـ FM البصري تقود الإشارة الراديوية للرسالة الأساس الثنائي الليزري LD ويحيط الطيف الناتج بالحامل البصري .

ويزيح الكشف الهيترودايني طيف الـ FM إلى التردد IF . عند هذه المرحلة يعيد مزيل التعديل تيار الـ FM إلى شكل موجة الرسالة الصوتية الأساسية .

وكبديل للتعديل الداخلي بواسطة تغيير تيار قيادة المنبع يمكن تطبيق المعلومات على الحامل خارجياً . يمكن للمعدِّلات الكهربصرية والكهرصوتية الخارجية ان تبدل الحزمة الضوئية بين وصل (ON) وقطع (OFF) من أجل الأنظمة الرقمية ويمكن ان تعدل الحامل البصري ترددياً من أجل أنظمة الـ FM . ويمكن أيضاً ان تعدل الحزمة تعديل شدة وتعديل استقطاب . يمكن كشف جميع هذه الصيغ وإزالة تعديلها بواسطة مستقبل هيترودايني . يمكن بناء معدلات كهربصرية وكهرصوتية كأجهزة كبيرة الحجم أو كمركبات بصرية متكاملة (كما نوقش بإيجاز في الفقرة 4 ـ 6) .

في بعض تطبيقات الألياف البصرية (المحاسيس بالدرجة الأولى) تعدِّل التغيرات المحيطية الحامل البصري مباشرة تعديلاً طورياً . ان الجيروسكوب الليفي البصري المرسوم في الشكل (10 ـ 20) هو مثال جيد لذلك . تنتشر



شكل (10 ـ 20) ـ جيروسكوب ليفي بصري .

حزم ضوئية متماثلة من ثنائي ليزري LD وحيد في كلا الاتجاهين حول ملف متعدد اللفات لليف وحيد الأسلوب . إذا كان الملف ثابتاً تبقى الحزمتان متماثلتين . وعندما يدور الملف حول محوره تتعرض الحزمة التي تسير في اتجاه الدوران إلى إزاحة في الطور بالنسبة إلى الحزمة التي تدور في الاتجاه المعاكس . يتناسب فرق الطور ، مقيساً بواسطة كشف هومودايني ، مع معدل الدوران .

تصف المعادلة (10 ـ 35) القدرة الواردة على مكشاف ضوئي جيروسكوبي . إذا ضعنا $\omega_{iF}=0$ ولتكن $P_L=P_S=P_o/2$ نحصل عندئذٍ على :

$$P = 0.5\ P_o\,(1 + \cos\Theta) \qquad (38\text{-}10)$$

حيث Θ هو فرق الطور الناتج عن الدوران . ويكون التيار المكشوف :

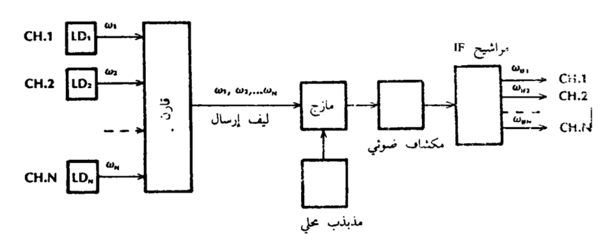
$$i = \frac{\eta\, e\, P_o}{2\, h\, f}\,(1 + \cos\Theta) \qquad (39\text{-}10)$$

وهكذا فان اتساع التيار الضوئي يُظهر قيمة انزياح الطور .

تجميع التقسيم الترددي البصري

Optic Frequency-Division Muliplexing (OFDM)

يمكن إرسال عدة رسائل بذات الآن على طول ليف بواسطة تجميع التقسيم الترددي البصري (OFDM) مترافقاً مع الكشف الهيترودايني كما يبدو على الشكل (10 ـ 21) . يعاير حرارياً عدد N من ثنائي ليزري متماثل لكي تبث هذه الثنائيات عند ترددات متفاوتة قليلاً $\omega_1, \omega_2, ..., \omega_N$ وتعدَّل الثنائيات بالرسائل المرغوبة . يقرن خرج كل ثنائي إلى الليف وتقرن الألياف المتعددة



شكل (10 ـ 21) ـ تجميع التقسيم الترددي البصري .

(بالصهر مثلاً) إلى ليف الإرسال . وعند المستقبل يمتزج الضوء من متذبذب محلي وحيد بكل حزمة مرسَلة فينتج تردد IF مختلف لكل قناة . وتفرز الترددات IF ($\omega_{IF1}, \omega_{IF2} \ldots \omega_{IFN}$) الكترونياً بواسطة مراشيح . تحدد سرعة المكشاف الضوئي التردد IF الأعظمي المسموح به .

يتشابه إلى حد ما كل من تجميع التقسيم الترددي البصري وتجميع التقسيم حسب طول الموجة . حيث يستعمل كل منها منابع بصرية منفصلة لكل قناة . أما الفروق بينها فهي مهمة على أي حال . يتطلب الـ OFDM كشفاً هيترودانياً بينما يستعمل الـ WDM كشفاً مباشراً . وأيضا تفرز أنظمة الـ WDM الأقنية في المجال البصري (قبل الكشف الضوئي) بينما تفرزها أنظمة الـ OFDM الكترونياً (بعد الكشف الضوئي) . ان الفرز الكهربائي عند الترددات الراديوية أكثر انتخابية بكثير من الفرز البصري . وهكذا يمكن ان تكون الأقنية المتجاورة أقرب إلى بعضها في أنظمة الـ OFDM مما هو في أنظمة الـ WDM . يسمح الفاصل الأضيق بين الأقنية المتجاورة بإرسال عدد أكثر من الأقنية في نافذة طول الموجة القصيرة ذات الخسارة الضعيفة المرغوبة وفي منطقة طول الموجة الطويلة ذات التبعثر الضعيف والخسارة الضعيفة .

مثال :

احسب فاصل القناة المسموح به لنظامي OFDM و WDM إذا كان للألياف في كلا الشبكتين عرض نطاق جزئي مساوٍ إلى 1٪ . افترض ان العمل يتم في نافذة طول الموجة القصيرة وإن ترددات الـ IF تساوي 1 GHz .

الحل :

لنعتبر أولاً ترشيحاً بصرياً . عند 850 nm يمثل نطاق مرور مقداره 1٪ قيمة 8.5 nm . وبافتراض ان عروض طيف المنابع أصغر بكثير فان الأقنية المتجاورة يمكن ان تفصل بمقدار 8.5 nm . باستعمال العلاقة الحاصلة من المعادلة (3 ـ 26) : $\Delta f = c\,\Delta\lambda/\lambda^2$ يكون الفاصل بين أقنية WDM المتجاورة :

3.5×10^{12} Hz . ومن جهة أخرى ان نطاق مرور مقداره 1٪ عند 1 GHz هو 10^7 Hz وهو الفاصل الأصغر لقناة OFDM . وعلى الأقل من حيث المبدأ تسمح تقنية OFDM بفاصل قناة أصغر بكثير مما تسمح به تقنية الـ WDM . في الحالات العملية تتطلب تغيرات تردد المرسل والمتذبذب المحلي التي يسببها تغير درجة الحرارة ان تتم المحافظة على فواصل أكبر من 10^7 Hz . ان اعتبار فواصل بقيمة 10^8 Hz ما يزال قائماً .

ميزات ومشكلات الكشف الهيترودايني

للكشف الهيترودايني عدة مظاهر جذابة حيث يجعل الوصلات البصرية المعدَّلة ترددياً ملائمة. وكذلك فان المستقبلات الهيتروداينيه أكثر حساسية من المستقبلات ذات الكشف المباشر . وسنشرح هذه الخاصة في الفصل التالي . يقدم المستقبل الأكثر حساسية استقبالاً أجود وإمكانية لأجل مسارات إرسال غير مكرَّرة أطول . فإذا احتاج الأمر لمكرِّرات يمكن ان تكون الفواصل بينها أكبر بمستقبل هيترودايني حساس مما هو في حال مستقبل ذي كشف مباشر .

ان التعقيد والكلفة المتزايدين هما الثمن المقابل لميزات الأنظمة الهيتروداينية . يجب ان تكون الثنائيات الليزرية أجهزة وحيدة الأسلوب . ويجب ان يكون الثنائي الليزري للمتذبذب المحلي والمنبع المرسل مستقراً ترددياً بحيث ان التردد IF لا ينحرف . ان تراصف حزمة كل من المتذبذب المحلي والإشارة (في المازج) حرج . يجب ان تتماثل جبهتا الموجتين وتتطابقان . ويجب ان تكون حجوم البقع والاستقطابات واتجاهات الانتشار ذاتها للحزمتين .

(10 ـ 6) ـ الخلاصة

لقد ناقشنا في بداية هذا الفصل عدة دارات تعديل بسيطة . توضح هذه الدارات الخطط الأساسية . ويمكن استعمالها كما وصفت أو يمكن ان تشكل الأساس لدارات أكثر تعقيداً .

لقد توسّعنا في عدد صيغ التعديل الممكنة بالنسبة لتلك المدروسة في الفصول السابقة . يوجز الجدولان (10 ـ 1) و (10 ـ 2) التقنيات المقدمة ومع انها ليست شاملة فان هذه القوائم تفيد في تطوير وتحليل أكثر النظم .

نوجز فيما يلي الأنواع المختلفة لمخططات التجميع المقدمة في هذا الكتاب :

1 ـ تجميع التقسيم الزمني (TDM) :

تُرتَّب بتّات المعطيات المطابقة للرسائل المختلفة فيما بينها لكي تشارك القناة الليفية زمنياً . يتطلب الأمر منبعاً بصرياً وحيداً ومكشافاً ضوئياً وحيداً إذا كان تداخل الرسائل وفصلها يجريان عندما تكون الإشارتان بالشكل الكهربائي (وليس بالشكل البصري) . يناسب الـ TDM الاتصالات الرقمية . فلا يغير سعة المعلومات لليف إنما يوزع فقط البتّات المسموح بها بين عدة رسائل .

جدول (10 ـ 1) ـ صيغ التعديل التماثلي

الاسم	الوصف	التعليق
تعديل النطاق الأساس		
ـ تعديل الشدة	تتغير القدرة البصرية طرداً مع رسالة النطاق الأساس .	أبسط مخطط تماثلي
ـ تعديل ترددي بصري	تعديل ترددي مباشر لحامل بصري	يتطلب كشفاً هيترودانياً
تعديل حامل فرعي		
ـ AM/IM	تعديل إشارة منبع بصري بواسطة إشارة ذات تردد أقل معدلة اتساعياً	يسمح بتجميع التقسيم الترددي لحامل فرعي
ـ FM/IM	تعديل شدة منبع بصري بواسطة إشارة معدّلة ترددياً	يسمح بتجميع التقسيم الترددي لحامل فرعي

2 ـ تجميع التقسيم حسب طول الموجة (WDM) :

تسير عدة رسائل بنفس الوقت على الليف وتكون كل رسالة محمولة عند طول موجة بصرية مختلف . يتطلب الأمر منابع متعددة تتذبذب عند ترددات مختلفة . يتم فصل الرسالة في المجال البصري قبل الكشف . وتظهر الحاجة إلى مكشاف ضوئي منفصل لكل رسالة . يناسب الـ WDM كلا من الإشارات الرقمية والإشارات التماثلية . تزداد سعة المعلومات لليف (تقريباً) بعامل مساوٍ إلى عدد الرسائل المجمَّعة من أجل الـ WDM . وبشكل أساسي تشكل كل مجموعة منبع ومكشاف قناة مستقلة .

جدول (10 ـ 2) ـ صيغ التعديل الرقمي

الاسم	التعليق
تعديل نبضي مرمَّز	
ـ عدم العودة إلى الصفر (NRZ)	يتطلب أصغر عرض نطاق من أجل الإرسال الرقمي .
ـ العودة إلى الصفر (RZ)	يتطلب ضعفي عرض نطاق أنظمة الـ (NRZ)
ـ مانشستر	استعادة نبضات الميقاتية ممكن
ـ ثنائي القطبية	سوية التيار المستمر تبقى ثابتة
تعديل موضع النبضة (PPM)	
تعديل مدة النبضة (PDM)	
تعديل حامل فرعي	
ـ الابراق بالوصل والقطع (OOK)	يسمح بـ FDM لحامل فرعي
ـ الابراق بإزاحة التردد (FSK)	يسمح بـ FDM لحامل فرعي
ـ الابراق بإزاحة الطور (PSK)	يسمح بـ FDM لحامل فرعي

3 ـ تجميع التقسيم الترددي لحامل فرعي (SFDM) :

تعدَّل الرسائل على حوامل فرعية مختلفة وتجمّع كهربائياً . وتعدِّل الإشارة المجمَّعة منبعاً بصرياً وحيداً . ويعيد مكشافٌ ضوئي وحيدُ الإشارة إلى الشكل الكهربائي . وعند هذه النقطة تقوم مراشيحُ الكترونية بفصل الرسائل . يمكن استعمال الـ SFDM من أجل كل من الإشارتين التماثلية والرقمية . وكما هو الحال في الـ TDM لا يزيد الـ SFDM سعة الليف . لا يمكن للتردد الأعظمي للحامل الفرعي ان يتجاوز عرض نطاق الليف . يوزع هذا المخطط فقط عرض النطاق المتوفر بين عدة رسائل .

4 ـ تجميع التقسيم الترددي البصري (OFDM) :

تعدَّل الرسائل على منابع ذات أطوال موجة مختلفة قليلاً . يعطي كشف هيترودايني باستعمال مكشاف ضوئي وحيد تيار إشارة يحتوي جميع الرسائل . ويحيط طيف كل رسالة تردداً متوسطاً مختلفاً . وتفصل الرسائل عندئذٍ بواسطة مراشيح الكترونية . يزيد الـ FDM البصري سعة الليف . وعملياً على أي حال ستحدد سرعة المكشاف الضوئي التردد المتوسط الأعظمي ويحدد هذا بدوره عدد الرسائل التي يمكن إرسالها .

يقال أحياناً ان التعديل الرقمي أكثر انسجاماً مع الاتصالات البصرية من التعديل التماثلي . تتضمن الحجج الميزات العامة للأنظمة الرقمية (نوعية إشارة محسنة ومسارات إرسال أطول ومكررات أبسط) والسهولة النسبية للتعديل الرقمي (وهو ببساطة تبديل المنبع بين حالتي وصل وقطع) ولا خطية المنابع البصرية (التي تسيء إلى الإشارات التماثلية) . وبرغم ذلك ان للإرسال الرقمي للرسائل التي تبدأ بشكل تماثلي (صوت وصورة مثلاً) مشاكله . ان السيئة الرئيسة هي الحاجة إلى تحويل الرسائل من الشكل التماثلي إلى الشكل الرقمي عند المرسل ومن الشكل الرقمي إلى الشكل التماثلي عند المستقبل . إن كلفة تجهيزات التبديل المطلوبة يمكن ان تبرر نظاماً تماثلياً كاملاً وخصوصاً من أجل مسارات إرسال قصيرة . وفي أي حال عندما لا تحدد مسبقاً طريقة التعديل فإن على مصمم النظام ان يعتبر كلا الصيغتين الرقمية والتماثلية .

مسائل الفصل العاشر

10 ـ 1 ـ يساوي عرض نطاق الـ (3-dB) لثنائي LED 80 MHz . وميل منحنى قدرة خرجه البصرية مقابل تيار الدخل يساوي 0.1 mW/mA . ويتألف تيار الدخل من مركبة تيار مستمر 50 mA ومركبة جيبية ذات تردد 40 MHz وتيار من قمة إلى قمة 60 mA .

أ ـ ارسم مخططاً لعدة دورات من تيار الدخل .

ب ـ احسب عامل التعديل لتيار الدخل .

ت ـ احسب القدرة البصرية الناتجة وارسمها بيانياً .

ث ـ احسب عامل التعديل البصري .

10 ـ 2 ـ كرر المسألة (10 ـ 1) اذا تغير تردد التعديل إلى : أ ـ 80 MHz ب ـ 120 MHz .

10 ـ 3 ـ صمِّم معدِّلاً تماثلياً كالمبين في الشكل (10 ـ 2) مستعملاً ترانزستوراً سيليكونياً ذا $\beta=60$. ضع تيار الانحياز المستمر عند 50 mA . ولتكن : $R_i=50\Omega$ و $R_a=3\ k\Omega$ $R_b=6\ k\Omega$ وجهد منبع الانحياز 10 V . عندما يكون المنبع الضوئي موجوداً (حالة ON) يهبط جهده إلى 1.8 V .

أ ـ حدّد قيمة مقاومة الباعث R_e .

ب ـ احسب جهد المجمع ـ الباعث عند النقطة Q .
ت ـ حدّد عامل التعديل الأعظمي الذي يمكن ان تقدمه هذه الدارة .

10 ـ 4 ـ ينتج ثنائي LED تشويهاً توافقياً كلياً مقداره 50 dB عندما يمر به تيار جيبي ذو قيمة قمة 2 mA . وان ميل منحنى القدرة مقابل التيار عند نقطة الانحياز للتيار المستمر هو 0.05 mW/mA . احسب قيمة مُعامِل اللا خطية (a_2 في المعادلة (10 ـ 9) .

10 ـ 5 ـ في المعدِّل الرقمي ذي المفتاح التسلسلي (شكل 10 ـ 5) . احسب تيار الثنائي LED عندما يكون المنبع في حالة التوصيل الكلي واحسب تيار القاعدة المطلوب لتحقيق هذا الشرط . استعمل خواص الترانزستور المبينة في الشكل (10 ـ 6) وليكن جهد المنبع 8 V و R=60 Ω . ان الجهد الأمامي للـ LED هو 1.8 V عندما يكون موصلاً كلياً .

10 ـ 6 ـ افترض انك تريد ان ترسل نطاق الاتصال الراديوي AM التجاري بكامله على ليف واحد . ارسم مخططاً كتلياً لتحقيق ذلك . ما هو عرض النطاق المطلوب للنظام ؟ استعمل تعديل AM/IM للحامل الفرعي .

10 ـ 7 ـ كرِّر المعادلة (10 ـ 6) مستعملاً تعديلاً رقمياً وتجميع التقسيم الزمني . (صمم مخططك لتغطية 10 محطات راديوية فقط) .

10 ـ 8 ـ كرِّر المعادلة (10 ـ 6) مستبدلاً نطاق الإرسال الراديوي AM بنطاق الإرسال FM التجاري الكلي . استعمل تعديل FM/IM للحامل الفرعي .

10 ـ 9 ـ ارسم مخططاً كتلياً لأجل إرسال جميع أقنية الـ VHF التلفزيونية في ليف واحد . استعمل تعديلاً تماثلياً . ما هو عرض النطاق المطلوب للنظام ؟

10 ـ 10 ـ كرِّر المسألة (10 ـ 9) مستعملاً تعديلاً رقمياً .

10 ـ 11 ـ يستعمل الـ LED ذو خواص الخرج المبينة في الشكل (6 ـ 5) في نظام بقناتين يعمل وفق تجميع التقسيم الترددي . يقدر تشوه الـ LED التوافقي الكلي بـ 25 dB عند تطبيق تيار جيبي ذي شدة تساوي 50 mA عند القمة . يحدد تيار الانحياز عند 50 mA ويكون التعديل AM لكل حامل فرعي 50٪ وتعديل الشدة IM 100٪ وترددا الحاملين الفرعيين 1 MHz و 2 MHz وشدتاهما عند القمة متساويتان . المعلومات لكلتا القناتين هي نغمة الـ 1000 Hz . اكتب معادلة تيار الدخل والقدرة المشَعّة عندما يهمل التشوه وعندما لا يهمل . تكشف كل القدرة المشَعّة بمكشاف ضوئي ذي استجابية مقدارها 0.5 A/W . احسب تيار المستقبِل وارسم طيفه بيانياً . هل يوجد أي لغط في هذا النظام ؟

10 ـ 12 ـ ارسم سلسلة النبضات للإشارة 1001110001010 لرموز RZ و NRZ ومانشستر وثنائية القطبية .

10 ـ 13 ـ صمّم مرسلاً بثلاثة سويات (كالمبين في الشكل b-14-10) . استعمل الترانزستور الموصوف في الشكل (10 ـ 6) . احسب قيم المركبات المستعملة . ان السويات الثلاثة للتيار القائد لثنائي الـ LED هي 0 mA و 73 mA و 146 mA وهبوط جهده هو بحدود 1.4 V عندما يحيّز عكسياً .

المراجع

الفصل العاشر

1. P.W. Shumate and M. DiDomenico, Jr. "Lightwave Transmitters." In *Semiconductor Devices for Optical Communication*, edited by H. Kressel. Berlin: Springer-Verlag, 1980. pp. 161-200.
2. R. Adair. "CW Lasers and LEDs." Application Note A/N 101. New Brunswick, N.J.: Laser Diode Laboratories, Inc.
3. Ibid.
4. Shumate. "Lightwave Transmitters." pp. 182-188.
5. Francois Favre, Luc Jeunhomme, Irene Joindot, Michel Monerie, and Jean Claude Simon. "Progress Towards Heterodyne-Type Single-Mode Fiber Communications Systems." *IEEE J. Quantum Electron.* 17, No. 6 (June 1981): 897-906.
6. Soichi Kobayashi, Yoshihisa Yamamoto, Minoru Ito, and Tatsuya Kimura. "Direct Frequency Modulation in Al Ga As Semiconductor Lasers. *IEEE J. Quantum Electron.* 18, no. 4 (April 1982): 582-95.
7. Shigeru Saito, Yoshihisa Yamamoto, and Tatsuya Kimura. "Optical FSK Heterodyne Detection Experiments Using Semiconductor Laser Transmitter and Local Oscillator." *IEEE J. Qunatum Electron.* 17, no. 6 (June 1981): 935-41.
8. Yoshihisa Yamamoto and Tatsuya Kimura. "Coherent Optical Fiber Transmission Systems." *IEEE J. Quantum Electron.* 17, no. 6 (June 1981): 919-35.
9. Thomas G. Giallorenzi, Joseph A. Bucaro, Anthony Dandridge, G. H. Sigael, J., James H. Cole, Scot C. Rashleigh, and Richard G. Priest. "Optical Fiber Sensor Technology." *IEEE J. Quantum Electron.* 18, no. 4 (April 1982): 626-65.

الفصل الحادي عشر

الضجيج والكشف
Noise and Detection

تسبب مجموعة من الظواهر المختلفة تدني الإشارات أثناء تقدمها خلال وصلة اتصالات ليفية . لقد ناقشنا سابقاً كيف يحدث تشوه الموجة في الليف وكيف يحد هذا من سعة معلومات المسار وطوله . وقد درسنا ، إضافة لذلك ، كيف تتخامد الإشارات بسبب خسارات الليف والاقتران والتوزيع . بدهي ان يقودنا ذلك للاعتقاد أنه يمكن ان يُسمح بقدر محدود فقط من التخامد قبل ان تصبح القدرة الواصلة إلى المستقبل صغيرة لدرجة يتعذر معها كشف الإشارة بدقة . ومن جهة أخرى يمكن ان نقرر بان المكبرات تستطيع ان ترفع الإشارة دائماً إلى السوية المطلوبة . ان الاستنتاج الأخير قد يكون صحيحاً إذا لم يكن مرتبطاً بظاهرة أخرى لاضطراب الإشارة ، الا وهي الضجيج . يخفض الضجيج جودة الإشارة وهو موجود دائماً (كما يبدو في الفقرة التالية) . يرافق تكبير الإشارة دائماً تكبير الضجيج بنفس القدر ويسهم المكبر ذاته بضجيج إضافي ولهذا السبب لا يستطيع التكبير ان يحسِّن نسبة قدرة الإشارة إلى قدرة الضجيج . وعندما تتناقص قدرة الإشارة المستقبلة لتقارب قدرة الضجيج تتناقص قابلية تمييزها أكثر فأكثر . لذا فان التخامد يحد في النهاية من طول نظام الإرسال الليفي .

سنبحث في هذا الفصل المصادر الرئيسة للضجيج ونبين كيف نحسب قدرته . يمكن حينئذٍ حساب جودة الإشارة التي تعطى كنسبة الإشارة إلى الضجيج . وفي الاتصالات الرقمية يزيد الضجيج احتمال الأخطاء . سنحسب أيضاً نسب الخطأ لهذه الأنظمة .

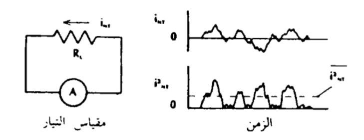
وسنصف في أواخر هذا الفصل تصاميم بضعة دارات مستقبل أساسية .

(11 ـ 1) ـ الضجيج الحراري وضجيج الطلقات
Thermal and Shot Noise

هناك سببان رئيسيان لتدني جودة الإشارة خلال الاستقبال وهما الضجيج الحراري وضجيج الطلقات .

الضجيج الحراري Thermal Noise

ينشأ الضجيج الحراري (المدعو أيضاً ضجيج جونسون وضجيج نايكويست) داخل مقاومة حمل (R_l) المكاشيف الضوئية . إن الالكترونات داخل أي ترانزستور لا تبقى ساكنة أبداً وهي ، بسبب طاقتها الحرارية ، تتحرك باستمرار حتى من غير جهد مطبق عليها . ان حركة الالكترون عشوائية لذا يكون التدفق الصافي للشحنة في أي لحظة باتجاه أحد القطبين . وهكذا يوجد في المقاومة تيار متغير عشوائياً كما يبينه الشكل (11 ـ 1) . وهذا هو تيار الضجيج



شكل (11 ـ 1)ـ تيار الضجيج الحراري .

الحراري i_{NT} . ويبلغ متوسط قيمته صفراً . يبلغ متوسط قدرة الضجيج المتولدة داخل المقاومة $R_L \overline{i^2_{NT}}$ حيث $\overline{i^2_{NT}}$ هو متوسط قيمة مربع تيار الضجيج الحراري . (تشير الشحطة إلى متوسط القيمة) . يبين الشكل (11 ـ 1) مربع تيار الضجيج ومتوسط قيمته. يضاف تيار الضجيج إلى تيار الإشارة الذي يولده المكشاف الضوئي . ويبين الشكل (11 ـ 2) النتائج عندما تضيء قدرة بصرية ثابتة P المكشاف الضوئي . وبدلاً من احتفاظ تيار الحمل بقيمة ثابتة عند $i = \eta eP/hf$ فانه يتغير حول هذه القيمة بشكل عشوائي . عندما تكون القدرة الواردة صغيرة لدرجة يكون عندها اتساعاً تياري الإشارة والضجيج متقاربان يُحجب عندها وجود الإشارة . وحتى بوجود كميات معتدلة من القدرة البصرية قد لا يكون تيار الإشارة كبيراً لدرجة كافية (بالنسبة لتيار الضجيج) لتحقيق الوضوح المرغوب في الاستقبال .

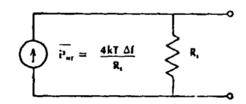


شكل (11 ـ 2) ـ تيار المستقبل عندما تكون القدرة البصرية ثابتة . يظهر تردّي الإشارة الناتج عن الضجيج الحراري .

يمكن ان يُمثل وجود الضجيج الحراري بالدارة المكافئة المرسومة في الشكل (11 ـ 3) . في هذه الدارة R_L هي مقاومة مثالية بدون ضجيج . ان الضجيج ينتج عن منبع تيار يولد تياراً متوسط مربعه هو :

$$\overline{i^2_{NT}} = \frac{4k\,T\,\Delta f}{R_L} \qquad (1\text{-}11)$$

حيث k هو ثابت بولتزمان (كما ورد في الجدول 1 ـ 2) و T هي درجة الحرارة المطلقة (°K) و Δf هو عرض النطاق الكهربائي للمستقبل . تحد عناصر الدارة في المستقبل عرض نطاقه . عند الترددات العالية تقطع المكبرات الإشارة



شكل (11 ـ 3) ـ الدارة المكافئة للضجيج الحراري .

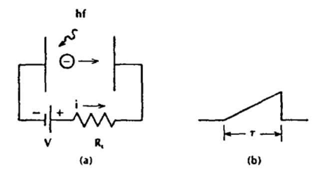
وتقصرها المكثفات . ومن أجل معالجة الرسالة المرغوبة كلها يجب ان يكون عرض نطاق المستقبل مساوٍ لعرض نطاق المعلومات على الأقل . مثلاً : تتطلب إشارة تلفزيونية أساسية مستقبلاً بعرض نطاق يساوي 6 MHz ومن جهة أخرى تبين المعادلة (11 ـ 1) أن الضجيج الحراري يخفض حتى الحد الأدنى بجعل عرض نطاق المستقبل صغيراً قدر الإمكان . ان الحل الوسط الأفضل هو أن نجعل عرض نطاق المستقبل مساوٍ إلى عرض نطاق المعلومات ويمكن تصميم مراشيح لتحقيق هذه الغاية .

تفترض المعادلة (11 ـ 1) ان طيف الضجيج الحراري منتظم عند جميع الترددات . ان هذا صحيح حتى 10 MHz تقريباً مما يجعل نموذجنا (الشكل 10 ـ 3) كافياً لتحليل معظم الأنظمة .

ضجيج الطلقات Shot Noise

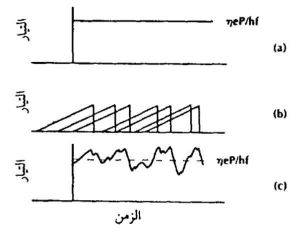
ان الطبيعة المتقطعة للكهارب تسبب اضطراب إشارة يدعى ضجيج الطلقات . وفي المكاشيف الضوئية سواء أكانت أنابيب باعثة للضوء أو أجهزة الوصلة نصف الناقلــة تولد الإشارات البصرية الواردة حوامل شحنة متقطعــة ويقدم كل حاملٍ نبضةً وحيدةً إلى التيار الكلي . نوضح هذا في حال الثنائي الضوئي المفرغ في الشكل (11 ـ 4) . تبدأ النبضة عندما يهرب الالكترون من المهبط وتنتهي عندما يصدم هذا الالكترون المصعد (حيث يختفي بانضمامه ثانية إلى شحنة موجبة) . وهكذا فان زمن دوام النبضة يساوي زمن عبور الالكترون τ (الزمن الذي يستغرقه الالكترون للمسير من المهبط إلى المصعد) . ان شكل

النبضة الصحيح ليس مهماً نسبياً . وعلى أي حال يمكن ان نفترض ان كل الكترون ضوئي ينتج نبضة مماثلة للنبضات الأخرى . ان تزايد اتساع التيار أثناء العبور ينشأ من تسارع الالكترون تحت تأثير قوة الحقل الكهربائي المتواجد بين القطبين . وكلما كان الالكترون أسرع كان التيار أكبر .



شكل (11 ـ 4) ـ (a) إرسال الكترون ضوئي وحيد و(b) نبضة التيار الناتجة .

لنتأمل الآن ماذا يحدث عندما تنير موجةٌ واردة ذات قدرة بصرية ثابتة P المهبط . نتوقع ان يكون التيار الضوئي ثابتاً كما يبينه الشكل (11 ـ 5) . وعلى أي حال ان هذا التيار الثابت مكون من عدد كبير من النبضات من النوع المبين في الشكل (11 ـ 4) . ومع ان جميع النبضات متماثلة فانها تتولد عند لحظات

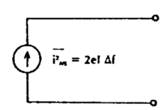


شكل (11 ـ 5) ـ ضجيج الطلقات . (a) ـ تيار ضوئي متوقع (مثالي) عائد إلى قدرة بصرية ثابتة P . (b) نبضات تيار منتج عشوائياً تولده الالكترونات المنبعثة و (c) مجموع نبضات التيار (التيار الكلي) .

عشوائية (كما يبينه الشكل 11 ـ 5) . ان إضافة نبضات متماثلة متأخرة عشوائياً لا ينتج سوية ثابتة . وبدلاً من ذلك ينتج تياراً مسنناً متوسط قيمته تعادل قيمة التيار المتوقع لحالة عدم الضجيج (η e P/hf) . ان الانحرافات عن التيار المثالي (الناشئة عن التولد العشوائي لحوامل الشحنة المتقطعة) هي ضجيج طلقات. ينشأ في الكاشيف الضوئية نصف الناقلة ضجيج طلقات من التوليد والتركيب العشوائي للثقوب والالكترونات الحرة .

يمكن تمثيل ضجيج الطلقات بدارة مكافئة تتألف من منبع وحيد للتيار كما يبينه الشكل (11 ـ 6) . تبلغ قيمة متوسط مربع تيار ضجيج الطلقات ما يلي :

$$\overline{i^2_{NS}} = 2\, e\, I\, \Delta f \qquad (2\text{-}11)$$



شكل (11 ـ 6) ـ الدارة المكافئة لضجيج الطلقات .

حيث e هو مقدار شحنة الالكترون و I هو متوسط تيار المكشاف و Δf هو عرض نطاق المستقبل . ان طيف ضجيج الطلقات منتظم عند جميع ترددات التعديل موضع الاهتمام (المعمول بها) . وكما هو حال الضجيج الحراري يعتمد تيار ضجيج الطلقات على عرض نطاق النظام وليس على موقع النطاق . وبموجب المعادلة (11 ـ 2) يتزايد ضجيج الطلقات مع تزايد التيار . وهكذا يتزايد ضجيج الطلقات بتزايد القدرة البصرية الواردة . يختلف هذا عن الضجيج الحراري الذي لا يعتمد على سوية القدرة البصرية . سنحدد في الفقرة التالية كيف يؤثر هذا السلوك على نوعية الإشارة وذلك بحساب نسبة الإشارة إلى الضجيج . وسنقدر عددياً أيضاً قدرة الضجيج كما تحددها المعادلتان (11 ـ 1) و (11 ـ 2) .

يتضمن التيار في المعادلة (11 ـ 2) كلاً من متوسط التيار الذي تولده الموجة البصرية الواردة وتيار الظلام I_D (الذي قدم في الفقرة 7 ـ 4) . نكتب حينئذٍ :

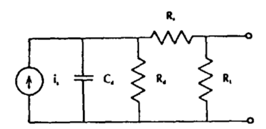
$$\overline{i_{NS}^2} = 2\,e\,(\,\overline{i_S} + I_D\,)\,\Delta f \qquad (3\text{-}11)$$

حيث i_S هو التيار الضوئي ويشير الخط إلى متوسط قيمته .

(11 ـ 2) ـ نسبة الإشارة إلى الضجيج

Signal -to- Noise Ratio

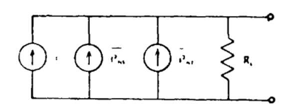
لقد عرضنا في الشكل (7 ـ 10) الدارة المكافئة لثنائي ضوئي ذي وصلة . ويبين الشكل (11 ـ 7) دارة أكمل وللتبسيط سنفترض أن سعة الثنائي



شكل (11 ـ 7) ـ دارة مكافئة لثنائي ضوئي ذي وصلة .

C_d وزمن العبور لا يحدان الإشارة . ويمكن عندئذٍ إلغاء C_d من الدارة المكافئة للضجيج . أما تأثيرها عليه فانه يدخل في حساب عرض نطاق المستقبل Δf . ان للثنائيات نصف الناقلة مقاومة تسلسلية R_s صغيرة (بضعة أومات) نتيجة التوصيل في معظم منطقتي p و n وهذه المقاومة ستُهمل . وبالمثل يكون للثنائي مقاومة R_d على التوازي مع منبع التيار المكافىء له وهذه هي مقاومة الوصلة الفقيرة . وحيث أن R_d تكون عادة أكبر بكثير من مقاومة الحمل R_L فيمكن تجاهلها .

بتذكرنا للافتراضات السابقة يمكن أن نوحد الآن الدارات المكافئة للثنائي ولمنبعي الضجيج الحراري وضجيج الطلقات . وتظهر النتيجة في الشكل (11 ـ 8) ومن هذه الدارة يمكن حساب نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR) في حالات مختلفة . سنحسب الـ SNR للحالات التالية :



شكل (8 ـ 11) ـ دارة استقبال لمكشاف ضوئي وتتضمن المنابع المكافئة للضجيج الحرارية ولضجيج الطلقات .

1 ـ قدرة بصرية واردة ثابتة :

ان هذا يطابق استقبال (1) في نظام ثنائي PCM . سنعتبر أولاً استعمال مكشاف من غير ربح داخلي (مثل ثنائي pn أو ثنائي PIN) ثم نبين التحسن باستعمال مكشاف بتكبير داخلي (مثل ثنائي ضوئي جرفي) أو باستعمال كشف هيترودايني .

2 ـ قدرة بصرية متغيرة جيبياً :

ان هذا يطابق إشارة تماثلية معدّلة الشدة .

حالة قدرة ثابتة Constant Power

في هذه الحالة يكون لتيار الإشارة الضوئي القيمة الثابتة التالية :

$$i_S = \frac{\eta e P}{h f} \qquad (4\text{-}11)$$

حيث P هي القدرة البصرية الواردة . يسلم الثنائي قدرة إشارة كهربائية متوسطة إلى مقاومة الحمل وهي :

$$\overline{P_{ES}} = i_S^2 R_L = \left(\frac{\eta e P}{h f} \right)^2 R_L \qquad (5\text{-}11)$$

ويبلغ متوسط قدرة ضجيج الطلقات المسلّمة إلى الحمل ما يلي : $\overline{i_{NS}^2} R_L$ وباستخدام المعادلتين (11 ـ 3) و(11 ـ 4) يصبح كما يلي :

$$\overline{P_{NS}} = 2\,e\,\Delta f\left(\frac{\eta\,e\,P}{h\,f} + I_D\right)R_L \qquad (6\text{-}11)$$

لقد استخدمنا التعويض $\overline{i_S}=\eta eP/hf$ لان القيم المتوسطة واللحظية هي ذاتها لحالة القدرة البصرية الثابتة .

ان قدرة الضجيج الحراري المسلمة إلى الحمل هي $\overline{i^2_{NS}}\,R_L$ والتي يمكن كتابتها باستعمال المعادلة (11 ـ 1) للتيار كما يلي :

$$\overline{P_{NT}} = 4\,k\,T\,\Delta f \qquad (7\text{-}11)$$

اننا الآن في وضع أفضل مما سبق من أجل تعريف نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR) بوضوح . ان الـ SNR هي متوسط قدرة الإشارة مقسوماً على متوسط قدرة منابع الضجيج جميعاً . وبتوحيد المعادلات (11 ـ 5) و (11 ـ 6) و (11 ـ 7) نحصل على ما يلي :

$$\frac{S}{N} = \frac{(\eta\,e\,P\,/hf)^2\;R_L}{2\,e\,R_L\,\Delta f\;(I_D+\eta\,e\,P\,/hf)\;+\;4k\,T\,\Delta f} \qquad (8\text{-}11)$$

دعنا نبحث بعض الحالات الخاصة . افترض ان متوسط تيار الإشارة $(\eta\,e\,P/hf)$ أكبر بكثير من تيار الظلام ، يمكن عندئذٍ إسقاط I_D من المعادلة (11 ـ 8) . تحدث هذه الحالة إذا كان تيار الظلام صغيراً وكانت القدرة البصرية ليست صغيرة جداً . افترض أيضاً ان قدرة ضجيج الطلقات تتجاوز قدرة الضجيج الحراري كثيراً لذلك يمكن تجاهل الحل $4k\,T\,\Delta f$. يجب ان تكون القدرة البصرية كبيرة نسبياً لكي يحدث هذا . وتختصر نسبة الإشارة إلى الضجيج حينئذٍ إلى ما يلي :

$$\frac{S}{N} = \frac{\eta\,P}{2h\,f\,\Delta f} \qquad (9\text{-}11)$$

في هذه الحالة تكون الـ SNR محددةً بضجيج الطلقات (وتدعى أيضاً محددة بالكَمْ (quantum limited)) . وهذه أفضل نتيجة يمكن الحصول عنيها .

في جوهر الأمر قد ألغينا بزيادة القدرة البصرية تأثيرات تيار الظلام والضجيج الحراري . يمكن إعادة كتابة نسبة الإشارة إلى الضجيج المحددة بالكَمْ بدلالة التيار الضوئي للإشارة بتوحيد المعادلتين (11 ـ 4) و (11 ـ 9) فنحصل على ما يلي :

$$\frac{S}{N} = \frac{i_S}{2\,e\,\Delta f} \qquad (10\text{-}11)$$

ولسوء الحظ ليس لدينا دائماً قدرة محدودة . عندما تكون القدرة صغيرة يغلب الضجيج الحراري عادة على ضجيج الطلقات فتؤول المعادلة (11 ـ 8) إلى ما يلي :

$$\frac{S}{N} = \frac{R_1\ (\eta\, e\, P\ hf)^2}{4k\ T\ \Delta f} \qquad (11\text{-}11)$$

وهذه هي النتيجة المحددة بالضجيج الحراري . وهي عادة أصغر بكثير من الـ SNR المحددة بالكمْ . لاحظ ان الـ SNR هذه الحالة يمكن ان تتحسن بزيادة مقاومة الحمل . وكما يشير إليه الجدول (7 ـ 3) على أي حال يمكن ان يخفض هذا عرض نطاق المستقبل ومداه الديناميكي . برى أيضاً من المعادلة (11 ـ 11) ان الـ SNR تتزايد مع تزايد مربع القدرة البصرية الواردة . ونستنتج بان تغيرات صغيرة نسبياً في كفاءة النظام تنتج تغيرات كبيرة في نوعية الإشارة المستقبلة في الأنظمة المحددة بالضجيج الحراري .

مثال :

افترض ان لدينا نظاماً يتألف من LED يبث مقدار 10 mw عند 0.85 μm ومن كابل ليفي ذي خسارة 20 dB ومن مكشاف ضوئي PIN ذي استجابة 0.5 A/W . تيار الظلام للمكشاف 2 nA ومقاومة الحمل 50 Ω وعرض نطاق المستقبل 10 MHz ودرجة حرارته 300°K (27°C) . تتضمن خسارات النظام بالإضافة إلى تخامد الليف نقص قدرة مقداره 14 dB بسبب اقتران المنبع وخسارة

مقدارها 10 dB بسبب الموصلات والوصلات المختلفة . احسب القدرة المستقبلة وتيار الإشارة المكشوفة وقدرتها وقدرة ضجيج الطلقات وقدرة الضجيج الحراري ونسبة الإشارة إلى الضجيج .

الحل :

تبلغ خسارة النظام الكلية : 14+20+10=44 dB . وباستعمال المعادلة (1 ـ 1) تنتج كفاءة إرسال مقدارها : $10^{-4.4}=4\times10^{-5}$. وتكون القدرة البصرية الواصلة إلى المستقبل حينئذٍ ما يلي :

$$P_R = 4\times10^{-5}\ (10) = 4\times10^{-4}\ \text{mw} = 0.4\ \mu W$$

يمكن حساب التيار الضوئي من المعادلة (7 ـ 1) . إذ أن الاستجابية معطاة ومنه :

$$i_S = \rho\ P_R = 0.5\ (0.4) = 0.2\ \mu A = 200\ n.A$$

ويكون تيار الظلام (2 nA فقط) صغيراً بالمقارنة مع تيار الإشارة وهكذا يمكن تجاهله في هذا المثال . وتكون قدرة الإشارة الكهربائية ما يلي :

$$\overline{P_{LS}} = i_S^2\ R_L = (0.2\times10^{-6})^2\ 50 = 2\times10^{-12}\ W$$

وتكون قدرة ضجيج الطلقات من المعادلة (11 ـ 6) ما يلي :

$$\overline{P_{NS}} = 2\ e\ i_S\ \Delta f\ R_L = 2\ (1.6\times10^{-19})\ (0.2-10^{-6})\ (10^7)\ (50)$$
$$= 3.2\ \times\ 10^{-17}\ W$$

وتكون قدرة الضجيج الحراري من المعادلة (11 ـ 7) ما يلي :

$$\overline{P_{NT}} = 4\ (1.38\times10^{-23})\ (300)\ (10^7) = 1.66\ \times\ 10^{-13}\ W$$

ان الضجيج الحراري في هذا النظام أكبر من ضجيج الطلقات بأربعة أمثال تقريباً . وتطبق النتيجة المحددة بالضجيج الحراري أي المعادلة (11 ـ 11) . يمكن حساب الـ SNR من تلك المعادلة أو من المعادلة التالية مباشرة :

$$\frac{S}{N} = \frac{\overline{P_{ES}}}{\overline{P_{NT}}} = \frac{2 \times 10^{-12}}{1.66 \times 10^{-13}} = 12$$

وإذا عبّرنا عن الـ SNR بالديسيبل تصبح : $10 \log_{10} 12 = 10.8$ dB . ومن أجل المقارنة يمكن ان نحسب الـ SNR المحددة بالكَمْ . من المعادلة (11 ـ 10) :

$$\frac{S}{N} = \frac{0.2 \times 10^{-6}}{2\,(1.6 \times 10^{-19})\,(10^{7})} = 62500 = 48 \text{ dB}$$

مثال :

في المسألة السابقة أنقِصْ خسارات النظام بمقدار 6 dB (ربما باستعمال ليف أفضل أو باقتران منبع محسَّن) . واحسب قيمة SNR الجديدة .

الحل :

إن خطوات الحل هي كتلك المتبعة في المسألة السابقة ولهذا سنعطي النتائج باختصار كبير . يطابق التحسن 6 dB زيادة في القدرة البصرية المستقبلة بعامل مقداره 4 . تتزايد قدرة التيار الضوئي للإشارة وقدرة ضجيج الطلقات بذات المقدار وهكذا تكون : $i_S = 0.8\ \mu A$ و $\overline{P_{NS}} = 12.8 \times 10^{-17}$ W . وتتزايد الإشارة المتدفقة في المقاومة R_L بمقدار 16 مرة إلى $\overline{P_{ES}} = 32 \times 10^{-12}$ W . وتبقى قدرة الضجيج الحراري دون تغير عند $\overline{P_{NT}} = 1.66 \times 10^{-13}$ W وهي لا تزال أكبر بكثير من قدرة ضجيج الطلقات . وتكون عندئذٍ : $S/N = \overline{P_{ES}}/\overline{P_{NT}} = 192$ أي أكبر بمقدار 16 مرة من الـ S/R الخاصة بالنظام ذي الخسارة الأكبر . وتساوي الـ S/N بالديسيبل 22.8 . ان مقارنة مع المسألة السابقة تبين ان زيادة في القدرة البصرية بمقدار 6 dB تنتج تحسناً في الـ SNR مقداره 12 dB .

يوضح المثال السابق نتيجة عامة لأنظمة محددة بالضجيج الحراري . إذا تزايدت القدرة البصرية بمقدار ΔP dB ستتزايد نسبة الإشارة إلى الضجيج بمقدار ضعفي ذلك المقدار (2ΔP dB) . ان هذا ينتج من المعادلة (11 ـ 11) التي تبين ان الـ SNR تتناسب مع مربع القدرة البصرية . من أجل أنظمة محددة بضجيج

الطلقات تؤدي زيادة في القدرة البصرة بمقدار ΔP dB إلى زيادة في الـ SNR مقدارها ΔP dB فقط كما تشير إليه المعادلة (11 ـ 9) وتكون الـ SNR متناسبة مع القدرة البصرية (وليس مع مربعها) .

يوضح المثالان السابقان أيضاً نوع الحسابات التي يقوم بها مصمموا النظام عند تحديد ما إذا كانت القدرة المتوفرة كافية للتطبيق المرغوب . سنبين في الفقرة التالية معدلات الخطأ الرقمية المطابقة إلى نسب الإشارة إلى الضجيج المحسوبة .

نستطيع أن نعدِّل معادلات الـ SNR بسهولة لكي تشمل مكاشيفاً ضوئية بربح داخلي . إذا كان M هو الربح فإن تيار الإشارة يتزايد بهذا المقدار . وتتزايد قدرة الإشارة حينئذٍ بالمقدار M^2 . ويكبر تيار ضجيج الطلقات أيضاً بالمقدار M . لذلك تتزايد قيمة متوسط مربعه بالمقدار M^2 كما يحدث لقدرة ضجيج الطلقات الناتجة . ان تيار الضجيج الحراري لا يكبّر لانه لا يتولد داخل المكشاف الضوئي . وبهذه التعديلات تصبح المعادلة (11 ـ 8) كما يلي :

$$\frac{S}{N} = \frac{(M\,\eta\, e\, P/hf)^2\; R_L}{M^2\; 2\, e\, R_L\, \Delta f\; (I_D + \eta\, e\, P/hf) \;+\; 4k\, T\, \Delta f} \qquad (12\text{-}11)$$

إذا كان الربح كبيراً بقدر كافٍ يمكن لضجيج الطلقات ان يتجاوز الضجيج الحراري بقدر كبير حتى من أجل سويات قدرة منخفضة قليلاً . في هذه الحالة (وبافتراض ان تيار الظلام يمكن إهماله) نجد

$$\frac{S}{N} = \frac{\eta\, P}{2\, hf\, \Delta f} \qquad (13\text{-}11)$$

وهي النتيجة المثالية المحددة بالكَمْ التي حصلنا عليها من المعادلة (11 ـ 9) .

مثال :

يبدل المكشاف PIN في المثال الأول من هذه الفقرة بمكشاف ذي استجابية أكبر بمقدار 160 مرة (M = 160) . وتبقى جميع الشروط الأخرى دون تغيير

وهكذا تكون القدرة البصرية الواردة على المكشاف مساوية لـ 0.4 μW . احسب الـ SNR .

الحل :

تتزايد قدرة ضجيج الطلقات من 3.2×10^{-17} W إلى :

$$\overline{P_{NS}} = (160)^2 \ (3.2\times10^{-17}) = 8.19\times10^{-13} \ W$$

وتبقى قدرة الضجيج الحراري عند : $\overline{P_{NT}} = 1.66\times10^{-13}$ W . ويكون ضجيج الطلقات الآن أكبر من الضجيج الحراري بحوالي خمسة مرات . ويكون النظام محدداً بضجيج الطلقات تقريباً . تتزايد قدرة الإشارة بمقدار M^2 عن القيمة الحاصلة بدون تكبير . وهكذا تكون :

$$\overline{P_{ES}} = (160)^2 \ (2\times10^{-12}) = 5.12 \times 10^{-8} \ W$$

وإذا شملنا الضجيج الحراري تصبح الـ SNR ما يلي :

$$\frac{S}{N} = \frac{\overline{P_{ES}}}{\overline{P_{NS}}+\overline{P_{NT}}} = \frac{5.12\times10^{-8}}{8.19\times10^{-13}+1.66\times10^{-13}} = 52000$$

أو 47.2 dB . وبإهمال الضجيج الحراري نحصل على النتيجة المحددة بالكَمْ وهي S/N=62500 أو 48 dB . ويبدو التحسن عن النظام المحدد بالضجيج الحراري (S/N=10.8 dB) واضحاً . في هذا المثال يكون النظام ضمن 1 dB من الحد الكمي المثالي .

يبين هذا المثال حقيقتين :

ـ تنتج العملية المحدَدة بالكم إشارات أفضل من إشارات الأنظمة المحددة بالضجيج الحراري وان لعملية المثالية المحددة بالكم يمكن بلوغها باستعمال مكاشيف ضوئية عالية الربح .

وبشكل أساسي يزيد ربح المكشاف الضوئي حساسية المستقبل . وتسمح الحساسية المحسَّنة بكشف الإشارات ضعيفة السوية كتلك التي توجد عند نهايات المسارات الليفية الطويلة . ان أطوال المسارات الطويلة تكون مفيدة

بشكل خاص عندما تستعمل مكررات لانه يمكن زيادة المسافات الفاصلة بين المكررات . ان هذا ينقص عدد المكررات المطلوبة حتى الحد الأدنى ويسمح بمرونة في تحديد موقعها الفيزيائي .

الضجيج الفائض للثنائي الضوئي الجرفي

Avalanche Photodiode Execss Noise

رغم أن المعادلة (11 ـ 12) تصلح بشكل تقريبي للمضاعفات الضوئية فانه يجب تعديلها من أجل الثنائيات الضوئية الجرفية (APD) . ان قدرة ضجيج الطلقات في الـ APD تتزايد وفق M^n وليس بحسب M^2 حيث n تقع بين 2 و 3 . تتزايد قدرة ضجيج الطلقات (بالنسبة إلى قدرة الإشارة) بعامل الضجيج الفائض $M^n/M^2=M^{n-2}$ في مكشاف ضوئي جرفي APD . وتصبح :

$$\frac{S}{N} = \frac{(M\,\eta\, e\, P/hf)^2\ R_L}{M^n\, 2\, e\, R_L\ \Delta f\ (I_D+\eta\, e\, P/hf)+4k\ T\ \Delta f} \qquad (14\text{-}11)$$

وكما شاهدنا سابقاً تؤدي زيادة الربح عن الواحد إلى تحسين الـ SNR بجعل الضجيج الحراري أقل أهمية عند سويات القدرة المنخفضة . وعلى أي حال إذا كان الربح كبيراً لدرجة ان ضجيج الطلقات يغلب نحصل على ما يلي (بافتراض اننا تجاهلنا تيار الظلام) :

$$\frac{S}{N} = \frac{1}{M^{n-2}}\ \frac{\eta\, P}{2\, h\, f\, \Delta f} = \frac{\text{SNR محدد بالكَمْ}}{\text{عامل الضجيج الفائض}}$$

تبين هذه المعادلة كيف ان الـ SNR المحددة بالكم تتناقص بعامل الضجيج الفائض . ومن الواضح انه عندما تصبح M كبيرة جداً تتدنى نوعية الإشارة . نستنتج انه يوجد قيمة مثالية لـ M (في مكان ما بين 1 و ∞) حيث تنتج قيمة SNR عظمى في المعادلة (11 ـ 14) . ولحسن الحظ يمكن تغيير ربح الـ APD بتغيير جهد الانحياز العكسي كما أشارت إليه المعادلة (7 ـ 17) سابقاً .

ان الضجيج الفائض للمكاشيف نوع In Ga As أكبر بكثير مما هو للمكاشيف السيليكونية . وهذا الضجيج كبير لدرجة ان الربح المثالي للثنائيات APD نوع In Ga As يمكن ان يكون أقل من 10^6 . في هذه الحالة يمكن ان يكون المكشاف APD أكثر حساسية بقليل فقط من ثنائي PIN جيد (تيار ظلام ضعيف) يتبعه مكبر متقدم ضعيف الضجيج . ان الحاجة للجهد العالي وتعقيد الدارة للجهاز الجرفي نوع In Ga As مع ما يرافق ذلك من ربح ضعيف يجعله إلى حد ما غير جذاب . ان مجموعة المكبر المتقدم والمكشاف PIN يمكن ان تكون الخيار الأفضل في بعض أنظمة الموجة الطويلة .

القدرة المكافئة للضجيج Noise Equivalent Power (NEP)

ان القدرة المكافئة للضجيج وهي مقياس بديل لحساسية المستقبل تتعلق بكمية القدرة البصرية الناتجة في نسبة إشارة إلى ضجيج مقدارها الواحد . ومن أجل التوضيح السهل لتعريفها وتحديدها اعتبر مكشافاً نوع PIN محدداً حرارياً وبجعل S/N=1 في المعادلة (11 ـ 11) وبإيجاد الحل لأجل القدرة ينتج :

$$P_{min} = (h\,f/\eta\,e)\,\sqrt{(4k\,T\,\Delta f/R_L)} \qquad (15\text{-}11)$$

وهذه هي القدرة الدنيا التي يمكن كشفها إذا أخذنا S/N=1 كمعيار للكشف . ان القدرة المكافئة للضجيج هي القدرة الدنيا التي يمكن كشفها مقيّسة بتقسيمها على الجذر التربيعي لعرض نطاق النظام . وفي الحالة المحددة حرارياً يكون :

$$NEP = P_{min}/\sqrt{\Delta f} = (hf/\eta e)\,\sqrt{(4k\,T/R_L)} \qquad (16\text{-}11)$$

وتقدر واحدات الـ NEP بـ $W/Hz^{1/2}$

يمكن حساب الـ NEP بطريقة مشابهة من أجل مكاشيف ذات ربح ومن أجل حالات لا يمكن فيها إهمال تيار الظلام . ولأجل هذا دع S/N=1 في التعبير العام للمعادلة (11 ـ 14) . وفي اعتبارنا ان القدرة الدنيا ستكون منخفضة جداً بحيث تكون $I_D >> \eta eP/hf$ فتكون النتيجة :

$$NEP = (hf/M\eta e)\,\sqrt{(M^n\,2e\,I_D + 4k\,T/R_L)} \qquad (17\text{-}11)$$

التي يمكن وضعها على الشكل التالي :

$$NEP = \frac{\sqrt{\overline{i}^2_{NSD} + \overline{i}^2_{NT}}}{\sqrt{\rho \, \Delta f}} \qquad (18\text{-}11)$$

حيث $\rho = M\eta e/hf$ هي استجابية المكشاف و $\overline{i}^2_{NSD}$ هو ضجيج الطلقات المكبّر العائد لتيار الظلام لوحده و $\overline{i}^2_{ND}$ هو الضجيج الحراري . من هذه المعادلة الأخير نرى أن الـ NEP تساوي جذر متوسط التربيع (RMS) لتيار الضجيج مقسوماً على الجذر التربيعي للاستجابية ولعرض النطاق .

تبين المعادلة (11 ـ 17) ان الضجيج الحراري يغلب في حال مقاومات أحمال صغيرة وربح مكشاف صغير . تظهر الحاجة للمقاومة الصغيرة من أجل تحقيق عرض نطاق كبير مطلوب لأنظمة التردد العالي بالرغم من أنها تنتج جهد خرج صغير . (يلخص الجدول 7 ـ 3 هذه الاستنتاجات) . وهكذا من أجل عمل عالي التردد يمكننا ان نتوقع أن يتغلب الضجيج الحراري على قيمة الـ NEP وسيكون تيار الظلام غير مهم . وانه يمكن استعمال ثنائي ضعيف نسبياً (تيار ظلام عالي) . ومن جهة أخرى في حال مقاومة كبيرة و/أو ربح كبير يمكن أن يتجاوز ضجيج تيار الظلام الضجيج الحراري . في هذه الحالة يجب ان نختار ثنائياً جيداً (ثنائياً بتيار ظلام صغير) من أجل الحصول على أعظم حساسية للمستقبل .

مثال :

لثنائي PIN استجابية قدرها 0.5 A/W عند 0.85 μm وتيار ظلام قدره 2 nA . احسب الـ NEP كتابع لمقاومة الحمل عند درجة حرارة 300°K . كم تبلغ القدرة الدنيا القابلة للكشف إذا كانت $R_L = 100\ \Omega$ وكان عرض النطاق 1 MHz ؟

الحل :

يبلغ التيار الفعال (RMS) للضجيج الحراري ما يلي :

$$\sqrt{\overline{i^2_{NI}}} = \sqrt{\frac{4k\,T\,\Delta f}{R_L}}$$

$$= \sqrt{\frac{4\,(1.38\times10^{-23})\,(300)\,\Delta f}{R_L}}$$

$$= 1.29 \times 10^{-10}\,\sqrt{\Delta f/R_L}$$

ويكون التيار الفعال لضجيج الطلقات ما يلي :

$$\sqrt{\overline{i^2_{NSD}}} = \sqrt{2\,e\,I_D\,\Delta f}$$

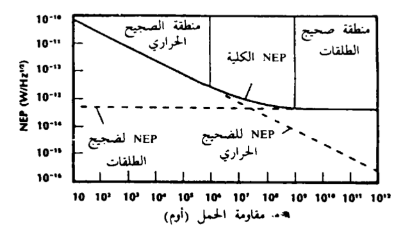
$$= \sqrt{[2\,(1.6\times10^{-19})\,(2\times10^{-9})\,\Delta f]}$$

$$= 2.53 \times 10^{-14}\,\sqrt{\Delta f}$$

وبتوحيد هذه النتائج باستجابية مقدارها 0.5 في المعادلة (11ـ 18) ينتج :

$$NEP = \sqrt{(2.56\times10^{-27} + 6.62\times10^{-20}/R_L)}$$

ويهمل الحد الأول العائد لتيار الظلام بالمقارنة مع الحد الثاني (الذي يتولد حرارياً) إلى ان تتجاوز مقاومة الحمل (10^6) أوم . يبين الشكل (11 ـ 9) الرسم البياني للـ NEP مقابل مقاومة الحمل حيث تظهر بوضوح المناطق التي يغلب فيها ضجيج الطلقات وتلك التي يغلب فيها الضجيج الحراري . ومن أجل



شكل (11 ـ 9) ـ القدرة المكافئة للضجيج (NEP) لثناي PIN ذي تيار ظلام قدره 2 nA واستجابية قدرها 0.5 A/W عند 300°K .

$R_L = 100\ \Omega$ تكون $NEP = 2.57 \times 10^{-11}\ W/Hz^{1/2}$. وعند عرض نطاق 1 MHz نجد أن :

$$P_{min} = \sqrt{NEP\ \Delta f} = 2.57 \times 10^{-11}\ (10^3) = 25.7\ nW$$

وفي بعض المؤلفات تعطى NEP المكشاف فحسب . ان الرقم المعطي هو مركّبة الـ NEP العائدة إلى تيار ظلام الثنائي . نرى من المعادلتين (11 ـ 7) و (11 ـ 8) أن قيمتها ستكون كما يلي :

$$NEP = (hf/M\eta e)\sqrt{(M^n\ 2\ e\ I_D} = \sqrt{(i^2_{NSD}\ /\ \Delta f)\ /\ \rho} \qquad (19\text{-}11)$$

نسبة الإشارة إلى الضجيج للتعديل التماثلي Analog Modulation SNR

إذا كانت الإشارة البصرية معدّلة جيبياً (ليست ثابتة) فاننا نحتاج فقط أن نغير النتيجة العامة للـ SNR في المعادلة (11 ـ 14) قليلاً . في الحالة الجيبية يمكن كتابة القدرة البصرية الواردة على المكشاف الضوئي كما يلي :

$$P_i = P\ (1 + m \cos \omega t) \qquad (20\text{-}11)$$

حيث m هو عامل التعديل و ω هو تردد التعديل و P هو متوسط القدرة الواردة .

وتنتج القدرة P_i تياراً ضوئياً قبل التكبير الداخلي يساوي :

$$i_s = \frac{\eta\ e\ P}{h\ f}\ (1 + m \cos \omega t) \qquad (21\text{-}11)$$

ان الحد الأول هو متوسط التيار $(\overline{i_s} = \eta e P/hf)$ أما الحد الثاني فهو إشارة المعلومات المرغوبة . وبعد التكبير يتزايد تيار الإشارة إلى ما يلي :

$$i = \frac{M\ \eta\ e\ P}{h\ f}\ .\ m \cos \omega t \qquad (22\text{-}11)$$

ويتدفق هذا التيار في مقاومة الحمل مقدماً قدرة إشارة كهربائية متوسطها هو $\overline{P_{ES}} = 0.5\ R_L\ i_p^2$ حيث i_p هي قيمة الذروة لتيار الإشارة . وهكذا تكون :

$$\overline{P_{ES}} = 0.5\ R_L\ (m\ M\ \eta\ e\ P/hf)^2 \qquad (23\text{-}11)$$

ان قدرة الضجيج في مقام الكسر للمعادلة (11 ـ 14) لم تتغير لأن P تمثل متوسط القدرة البصرية بشكل صحيح في كلا الحالتين الجيبية والثابتة وتكون حينئذٍ :

$$\frac{S}{N} = \frac{(m^2/2)\ (M\ \eta\ e\ P/hf)^2\ R_l}{M^n\ 2e\ R_L\ \Delta f\ (I_D+\eta eP/hf)\ +\ 4k\ T\ \Delta f} \qquad (24\text{-}11)$$

وتختلف هذه النتيجة عن حالة القدرة الثابتة بالعامل $m^2/2$ فقط . ان الـ SNR المحددة بضجيج الطلقات وتلك المحددة بالضجيج الحراري هي على التالي :

$$(1) \qquad \frac{S}{N} = \frac{(m^2/2)}{M^{n-2}} \cdot \frac{R_L\ (\eta\ e\ P/hf)^2}{4k\ T\ \Delta f}$$

$$(2) \qquad \frac{S}{N} = \frac{(m^2/2)}{M^{n-2}} \cdot \frac{\eta\ P}{2\ hf\ \Delta f}$$

وللحصول على SNR من هاتين المعادلتين عندما لا يوجد ربح نجعل M=1
وللحصول على SNR عندما لا يوجد ضجيج فائض نجعل n=2 .

من أجل نسبة تعديل 100٪ تكون m=1 وتكون الـ SNR ذات قيمة عظمى . وحيث أن الـ SNR تتغير كمربع عامل التعديل يؤدي جعل m أكبر ما يمكن إلى دعم استقبال الإشارات التماثلية . وعلى أي حال عند تزايد m يعمل المنبع على مدى أكبر من منحنيات خواصه للتيار والقدرة . يمكن ان تحد لا خطية هذه الخواص (التي تسبب تشوه الإشارة) من المدى المفيد الذي يحد بدوره من القيمة العظمى المسموح بها لعامل التعديل .

يمكن ان يتطلب الإرسال التماثلي عريض النطاق (مثل الذي يحتاجه الإرسال الفيديوي) نسبة إشارة إلى ضجيج بحدود من 40 dB إلى 60 dB .

نسبة الإشارة إلى الضجيج في النظام الهيترودايني Heterodyne SNR

لقد بينا في الفقرة (10 ـ 5) ان مكشافاً هيترودايناً ينتج تياراً متوسطاً وفق المعادلة (10 ـ 36) يساوي :

$$i_{d.c.} = \frac{\eta e P_L}{2 hf} \left(1 + \frac{P_S}{P_L}\right)$$

وينتج تيار IF وفق المعادلة (10 ـ 37) يساوي مايلي :

$$i_{IF} = \frac{\eta e}{h f} \sqrt{(P_S P_L)} \cos [\omega_{IF} t + \Theta (t)]$$

حيث P_L و P_S هما القدرتان البصريتان في حزمتي المتذبذب المحلي والإشارة . ستكون قدرة المتذبذب المحلي P_L ثابتة دائماً . وسنحدد الـ SNR للحالة التي تكون فيها قدرة الإشارة P_S ثابتة أيضاً .

ان متوسط قدرة الإشارة المسلمة إلى مقاومة الحمل هو : $\overline{P_{ES}}=0.5R_L(i_{IF\,P})^2$ حيث $i_{IF\,P}$ هي قيمة الذروة للتيار IF . تكون قدرة الإشارة حينئذٍ وفق ما يلي :

$$\overline{P_{ES}} = 0.5\, R_L\, P_S\, P_L\, (\eta e/hf)^2 \qquad (25\text{-}11)$$

ان النتيجة الأكثر إثارة هي تكبير الإشارة الذي تقدمه قدرة المتذبذب المحلي فكلما كانت P_L أكبر كانت قدرة الإشارة الكهربائية أكبر .

وكما في السابق تكون قدرة ضجيج الطلقات هي : $\overline{P_{NS}}=2eR_L I\,\Delta f$ حيث I هو متوسط التيار الكلي . في هذه الحالة يكون I هو تيار الظلام إضافة إلى التيار الضوئي المستمر (DC) وهكذا يكون :

$$\overline{P_{NS}} = 2\, e\, R_L\, \Delta f \left[I_D + \frac{\eta e P_L}{2 hf} \left(1 + \frac{P_S}{P_L}\right)\right] \qquad (26\text{-}11)$$

ويبقى الضجيج الحراري عند $\overline{P_{NT}}=4kT\,\Delta f$ غير متأثر بطريقة الكشف وتصبح الـ SNR كما يلي :

$$\frac{S}{N} = \frac{\overline{P_{ES}}}{\overline{P_{NS}} + \overline{P_{NT}}}$$

$$= \frac{0.5\, (\eta e/hf)^2\, R_L\, P_S\, P_L}{2\, e\, R_L\, \Delta f\, \{I_D+\eta\, e\, P_L/2\, hf)\, (1+P_S/P_L)] + 4k\, T\, \Delta f} \qquad (27\text{-}11)$$

لاحظ انه عندما تكون الـ P_L كبيرة يغلب ضجيج الطلقات وهذا هو الوضع عادة لأن المتذبذب المحلي موضوع عند المستقبل . وان الـ P_L لا تعاني من خسارات الانتشار والتوزيع والاقتران كما تعاني الحزمة المرسَلَة . وعندما تكون P_L كبيرة تبسَّط المعادلة (11 ـ 27) إلى :

$$\frac{S}{N} = \frac{\eta P_S}{2\,hf\,\Delta f} \qquad (28\text{-}11)$$

وهي نسبة الإشارة إلى الضجيج المحددة بالكَمْ والمتضمنّة في المعادلة (11 ـ 9) . نستنتج ان المكاشيف الهيترودواينية حساسة جداً وتقدم قيمة الـ SNR المثالية (حتى عند سويات إشارة ضعيفة) . إن الكشف الهيترودوايني لا ينتج ضجيجاً فائضاً (مثل الـ APD) وهكذا يمكن بالفعل الحصول على الـ SNR المحدد بالكَمْ .

(11 ـ 3) ـ معدلات الخطأ Error Rates

ان شكل الموجة المرسلة في الأنظمة التماثلية مهم جداً . وحتى ان مقادير صغيرة من الضجيج تحط من شكل الموجة إلى حد ما . يجب ان يحدد مصمم النظام ما هو مقدار الضجيج المقبول ويضع الـ SNR كبيرة بما فيه الكفاية لكي يضمن إعادة انتاج الإشارة بالأمانة المطلوبة . ومن جهة أخرى فإننا لا نحتاج أن نحافظ على شكل النبضة الرقمية بدقة . إذ أن المستقبلات الرقمية تحتاج فقط إلى وجود (أو غياب) النبضات خلال فترات معينة . سنصف في هذه الفقرة كيف ان الضجيج يدخل أخطاء إلى هذا التحديد .

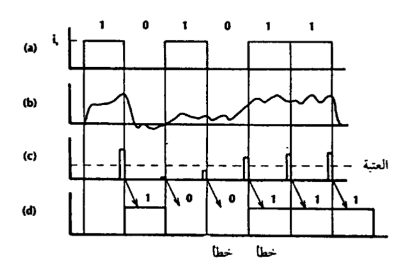
ان معدل خطأ البتّة (BER) الذي هو العدد الجزئي لأخطاء الكشف هو مقياس لجودة النظام الرقمي . فإذا اكتشف خطأ واحد من كل 100 قرار يكون الـ BER مساوياً 0.01 . يعني هذا أن فرصة حدوث خطأ خلال فترة أي بتّة واحدة يساوي فقط الـ BER . وهكذا إذا كانت BER=0.01 فان احتمال الخطأ P_e هو 0.01 فالعبارتان : معدل خطأ البتّة واحتمال الخطأ قابلتان للتبادل فيما بينهما .

لا يزال وضع تفسير آخر لمعدل الخطأ ممكناً . مع انه لا يمكننا تقسيم بتّة مستقلة أو خطأ مستقل فان P_e لا تزال تُرى على انها عدد الأخطاء لكل بتّة . من أجل معدل معطيات مقداره R bps فان عدد الأخطاء بالثانية يساوي $R\,P_e$ (حاصل جداء البتّات بالثانية بالأخطاء لكل بتّة) . إذا كانت $P_e=0.01$ و R=1 Mbps فانه يوجد 10000 خطأ بالثانية . وقد لا يكون هذا مسموحاً به . ان تغيير P_e إلى 10^{-9} يخفض الأخطاء إلى 0.001 خطأ بالثانية أو خطأ واحد في كل 1000 ثانية (16.7 دقيقة) . ان معدل خطأ مقداره 10^{-9} ملائم لأجل تطبيقات عديدة .

معدل الخطأ المحدود بالضجيج الحراري

Thermal Noise-Limited Error Rate

يوضح الشكل (11 ـ 10) كيف ان الضجيج الحراري ينتج أخطاء كشف . يبين الجزء (a) من الشكل التيار المستقَبل المثالي (بدون ضجيج) ويبين الجزء (b) التيار الفعلي مبيناً تأثير الضجيج والترشيح المضافين . تؤخذ عينات من هذا التيار قرب نهاية كل فترة بتّة (حيث يبدو ان النبضات في الغالب تصل



شكل (11 ـ 10) ـ أخطاء الكشف . (a) تيار مستقبل مثالي و (b) تيار فعلي و (c) عينات التيار و (d) نموذج المعطيات الناتجة .

اتساعاتها العظمى) وتظهر النتيجة كما في (c) . وعند هذه النقطة يقارن اتساع كل عينة بقيمة مرجعية (أو بقيمة عتبة) . يقع تيار العتبة في مكان ما بين الصفر والتيار المثالي المتوقع عندما يصل رقم (1) (وهو i_s في الشكل) . وإذا تجاوزت العينةُ العتبةَ تعالج لاحقاً كـ (1) . وإذا كانت العينة أصغر من العتبة فإنها تعامل كـ (0) . يبين الجزء (d) من الشكل نموذج المعطيات الناتج .

لننظر بدقة أكثر إلى أسباب التشوه في سلسلة النبضات المتشوهة في الشكل (b-10-11) . عندما يرد (0) لا يُنتج مستقبِل مثالي أي تيار . وفي الحقيقة يُنتج الضجيج الحراري وضجيج الطلقات لتيار الظلام تيارات عشوائية . يمكن أن يكون تيار الضجيج في المتوسط صغيراً وقد يكون كبيراً لدرجة كافية أثناء فترات بعض البتّات ليتجاوز العتبة فيحدث خطأ في هذه الحالة . وعندما يصل الـ (1) يكون التيار المثالي ثابتاً (انظر سوية i_s في الشكل a-10-11) . وفي المستقبل الفعلي يمكن ان يجمع الضجيج إلى التيار المرغوب وبسبب تخالفهما في الطور يؤدي ذلك إلى انخفاض التيار الكلي بعيداً دون سوية العتبة فيحدث خطأ من جديد . يبين الشكل أخطاء في كشف كل من الأصفار والواحدات . ومن الواضح ان العتبة لا يمكن ان تكون قريبة من الصفر وقد يزيد هذا عدد الأخطاء عند كشف الأصفار . ولا يمكن أيضاً ان تكون قريبة جداً من السوية المثالية i_s حيث ستحدث أخطاء أكثر في كشف الواحدات . وكما يمكن توقعه تكون سوية العتبة التي تنتج أقل أخطاء هي نصف التيار المثالي المستقبَل عندما يصل (1) ، (نضع تيار العتبة مساوياً إلى $0.5\ i_s$) . وهذه هي العتبة المثالية إذا كان الواحدات والأصفار متساويين . وهذا هو الحال على الأرجح لمعظم الرسائل . وإذا تغيرت القدرة المستقبَلة (مثلاً بسبب تقادم المنبع الضوئي) فيجب تحديد العتبة من جديد .

من المفيد ان نوجز أن القرار (0 أو 1) في النظام المحدود بالضجيج الحراري يتخذ بمقارنة اتساع تيار الإشارة بسوية عتبة محددة مسبقاً .

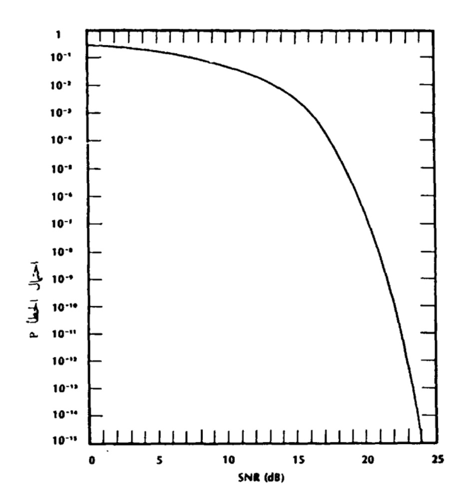
وباستعمال عتبة مقدارها $0.5\ i_s$ ينتج احتمال خطأ مقداره :

$$P_e = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\ \mathrm{erf}\left[0.354\sqrt{\left(\frac{S}{N}\right)}\right] \qquad (29\text{-}11)$$

حيث:erf هو تابع الخطأ (وهو كمية معروفة جدا ومجدوَلة) . يبين الجدول (11 ـ 1) قيم تابع الخطأ من أجل متحولات تقع بين صفر و 3 . أما من أجل متحولات أكبر من 3 فانه يرد في الجدول معادلة تعطي قيماً تقريبية. يبين الشكل (11 ـ 11) رسماً بيانياً لاحتمال الخطأ . ان نسبة الإشارة إلى الضجيج المستعملة في تحديد P_e هي القيمة المحدودة بالضجيج الحراري المعطاة بالمعادلة (11 ـ 11) للكشف المباشر باستعمال مكشاف PIN . لا تطبق المعادلة (11 ـ 29) على الأنظمة المحددة بضجيج الطلقات . وسنحدد الـ P_e لأنظمة كهذه فيما بعد في هذا الفصل .

جدول (11 ـ 1) ـ تابع الخطأ

x	erf x	x	erf x
0.00	0.00000	1.05	0.86244
0.05	0.05637	1.10	0.88021
0.10	0.11246	1.15	0.89612
0.15	0.16800	1.20	0.91031
0.20	0.22270	1.25	0.92290
0.25	0.27633	1.30	0.93401
0.30	0.32863	1.35	0.94376
0.35	0.37938	1.40	0.95229
0.40	0.42839	1.45	0.95970
0.45	0.47548	1.50	0.96611
0.50	0.52050	1.55	0.97162
0.55	0.56332	1.60	0.97635
0.60	0.60386	1.65	0.98038
0.65	0.64203	1.70	0.98379
0.70	0.67780	1.75	0.98667
0.75	0.71116	1.80	0.98909
0.80	0.74210	1.85	0.99111
0.85	0.77067	1.90	0.99279
0.90	0.79691	1.95	0.99418
0.95	0.82089	2.00	0.99532
1.00	0.84270	2.50	0.99959
		3.00	0.99998



شكل (11 ـ 11) ـ احتمال الخطأ للأنظمة المحدودة بالضجيج الحراري . .

وجدنا في الفقرة (11 ـ 2) نسبتي إشارة إلى ضجيج بقيمة 10.8 dB و 22.8 dB لنظامين محدودين بالضجيج الحراري . ويبلغ معدلا الخطأ المطابقان من الحسابات المباشرة للمعادلة (11 ـ 29) أو من الشكل (11 ـ 11) 4.2×10^{-4} و 2.6×10^{-12} على التتالي .

مثال :

تستعمل وصلة 1 Mbps NRZ مقاومة حمل مقدارها 100 أوم عند 300°K . يبلغ طول الموجة 0.82 μm ومعدل الخطأ المرغوب 10^{-4} وكفاءة الكمْ

للمكشاف PIN تساوي الواحد . احسب القدرة البصرية الواردة على المكشاف الضوئي والتيار الضوئي وعدد الفوتونات الواردة لكل بتّة .

الحل :

نجد من الشكل (11 ـ 11) أن معدل خطأ مقداره 10^{-4} يتطلب : S/N=17.5 dB أي : S/N=56.2 . وبحل المعادلة (11 ـ 11) من أجل القدرة الواردة ينتج أن :

$$P = (hf/\eta e) \sqrt{(4k\,T\,\Delta f/R_L)}\ \sqrt{(S/N)}$$

ان التردد البصري هو : $f=c/\lambda=3.66\times10^{14}$ Hz وزمن دوام النبضة هو : $\tau=10^{-6}$ s. سنضع عرض نطاق المستقبل بتخفظ عند : $\Delta f=1/\tau=10^6$ Hz . نكتب حينئذٍ :

$$P = \frac{6.63\times10^{-34}\ (3.66\times10^{14})}{1.6\times10^{-19}} \sqrt{\frac{4\ (1.38\times10^{-23})\ (300)\ 10^2}{100}} \times \sqrt{56.2}$$

$$P = 1.46 \times 10^{-7}\ W = 146\ nW$$

وهذه هي القدرة البصرية الواردة المطلوبة من أجل $BER=10^{-4}$. ان التيار المكشوف هو : $i=\eta eP/hf=96.4$ nA . وعدد الفوتونات الواردة بالثانية كما حدد في الفقرة (7 ـ 2) هو : P/hf . وهكذا يكون عدد الفوتونات الواردة في فترة البتّة τ هو : $n_P=(P/hf)\,\tau$. وفي هذا المثال يكون :

$$n_P = \frac{-\ 146\times10^{-9}\ (10^{-6})}{6.63\times10^{-34}\ (3.66\times10^{14})}$$

$$= 6 \times 10^5\ \text{photons/bit}$$

يتطلب الأمر عدداً كبيراً من الفوتونات لتحقيق معدل خطأ مقداره 10^{-4} في نظام محدد بالضجيج الحراري .

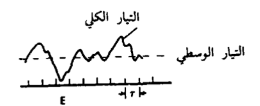
ومن أجل نسب إشارة إلى ضجيج أفضل من 15 dB أو بحدود ذلك يبين الشكل (11 ـ 11) تحسناً كبيراً في معدل الخطأ بزيادة صغيرة فقط في قدرة الإشارة . وبالنتيجة يمكن ان نحسن جودة الإرسال بقدر كبير بإنقاص خسارات النظام ولو بمقدار صغير .

معدل الخطأ المحدود بضجيج الطلقات Shot Noise-Limited Error Rate

من أجل نظام محدود بضجيج الطلقات يَعدّ معالج الكشف التالي عدد الالكترونات المنتَجة خلال فترة كل بتّة ويقارن هذا العدد مع عتبة ما . فإذا تجاوز العد العتبة فان المستقبل يفترض أن (1) قد أرسل وإذا كان العد أقل من العتبة فيفترض أن (0) قد أرسل .

تحدث أخطاء عند استقبال أصفار لأن تيار الظلام يحتوي أحياناً الكترونات كافية خلال فترة بتّة واحدة فيتجاوز العتبة . ان تيارات الظلام الموجودة في نشرات المصنّع هي القيم المتوسطة . يتغير تيار الظلام اللحظي عشوائياً حول هذا الرقم . ويمكن ان يبلغ قيماً كبيرة نسبياً لفترات قصيرة من الزمن .

وعند استقبال واحدات (1) تحدث أخطاء إذا كان عدد الالكترونات المنتَجة من اجتماع تيار الإشارة مع تيار الضجيج لا يتجاوز العتبة . يحدث هذا إذا كان تيار الضجيج كبيراً لدرجة كافية وإذا كان مختلفاً في الطور مع تيار الإشارة أثناء معظم فترة بتّة واحدة . وبهذه الطريقة يهبط التيار الكلي غالباً دون القيمة المطلوبة للوصول إلى تعداد العتبة . يحدث هذا النوع من الخطأ حتى إذا لم يوجد تيار ظلام . ان ضجيج الطلقات وحده المولّد من الإشارة يمكن ان يُنقص تعداد الالكترونات الكلي . ويمكن ان نوضح هذا العرض الأخير بالإشارة إلى الشكل (11 ـ 12) الذي يبين التيار المستقبل عندما تكون القدرة الواردة ثابتة . (يمكن ان نتخيل ان هذا هو التيار عندما تستقبل سلسلة من الواحدات في نظام NRZ) . وعادة يتدفق تيار ثابت في دارة المكشاف . وعلى أي حال ينحرف التيار اللحظي عشوائياً حول متوسط قيمته نتيجة التوليد



شكل (11 ـ 12) ـ تيار إشارة مع ضجيج طلقات عندما تكون القدرة البصرية ثابتة نتيجة سلسلة من واحدات NRZ . يحدث خطأ في فترة البتّة E .

والاجتماع العشوائي لحوامل الشحنة (هذا هو ضجيج الطلقات للإشارة) . ويوجد احتمال محدود وهو ان عدد الالكترونات المولَّدة سيكون أقل من العتبة خلال أية فترة بتّة. ان الفترة E في الشكل هي مثال حيث يحدث فيه خطأ بسبب التيار الصغير خلال فترة بتّة واحدة .

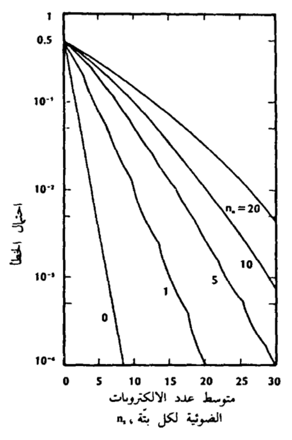
يبين الشكل (11 ـ 13) رسماً بيانياً لمعدل خطأ محدد بضجيج الطلقات من أجل الحالة التي تظهر فيها الواحدات والأصفار في الغالب بالتساوي . يبدو انه لا بد من بعض التوضيح لفهم هذا الشكل . يعتمد احتمال الخطأ على متوسط عدد الالكترونات الضوئية n_S المتولدة بواسطة الإشارة خلال فترة البتّة τ . تعطى n_S بدلالة القدرة البصرية بالمعادلة التالية :

$$n_S = \frac{\eta P \tau}{hf} = \frac{i_s \tau}{e} \qquad (30\text{-}11)$$

حيث η هو مردود الكم و hf هي طاقة الفوتون و i_s هو تيار الإشارة . يعتمد معدل الخطأ أيضاً على متوسط عدد الالكترونات n_n التي ينتجها تيار الظلام I_D ويعطى هذا العدد وفق ما يلي :

$$n_n = \frac{I_D \tau}{e} \qquad (31\text{-}11)$$

تطبق المنحنيات المبينة على الشكل عندما يكون لعتبة الكشف القيمة المثلى . وعندما تتساوى الواحدات والأصفار تبلغ العتبة التي تُنقِص P_e حتى الحد الأدنى ما يلي :



شكل (11 ـ 13) ـ احتمال الخطأ من أجل نظام PCM محدد بضجيج الطلقات . عندما يستقبل (1) يكون n_s هو متوسط عدد الالكترونات الضوئية المتولدة . ويكون n_n هو متوسط عدد الالكترونات المتولدة بواسطة تيار الظلام .

$$k_T = \frac{n_s}{\ell_n \ (1+n_s/n_n)} \qquad (32\text{-}11)$$

ان تعداد العتبة الفعلي k_D هو عدد صحيح يجعل مساوياً إلى k_T إذا كان k_T ذاته عدداً صحيحاً . والا فيجعل k_D مساوياً إلى أقرب عدد صحيح أكبر من k_T .
ان سبب الانكسارات في منحنيات الخطأ يعود إلى تغيرات في الـ k_D التي يحتاجها انقاص P_E للحد الأدنى .

ستوضح عدة أمثلة لانقاص العتبة إلى الحد الأدنى . افترض انه لا يوجد تقريباً تيار ظلام ($n_n \approx 0$) . تعطي المعادلة (11 ـ 32) حينئذٍ عتبة تقع بالكاد فوق الصفر . نضع تعداد العتبة الفعلي عند الكترون واحد ($k_D=1$) . وحيث انه لا يوجد فرضاً تيار ظلام سيكون التيار المكشوف دائماً صفراً وسوف لن يكون هناك أي أخطاء عندما يرسل النظام أصفاراً . يُفترض وصول (1) بكشف الكترون واحد أو أكثر . ان السبب الوحيد لحدوث أخطاء في هذه الحالة ، إن حدثت ، هو ان التدفق الفوتوني الوارد قد لا يولد أية الكترونات ضوئية خلال فترة بتّة ما . عندما تكون القدرة الواردة ثابتة نستطيع ان نحدد متوسط عدد الفوتونات لكل بتّة . وعلى أي حال يتغير العدد الفعلي الواصل خلال أية فترة بتّة عشوائياً حول هذه القيمة . عندما يكون المعدل منخفضاً (لنقل بضعة فوتونات فقط لكل بتّة) من الممكن جداً ألا يصدم أي فوتون المكشاف فعلاً أثناء فترات بعض البتّات . بالإضافة لذلك فإن مردود الكم للمكشاف هو قيمة متوسطة فقط . مثلاً إذا كانت $\eta=0.80$ فان الفوتونات تولد الكترونات في 80٪ من الوقت فقط . من وجهة نظر أخرى ان احتمال توليد الفوتون لالكترون حر هو 80٪ . من الممكن أحياناً ان ترد عدة فوتونات ولا تحرر أية الكترونات على الإطلاق خلال فترة البتّة . وبالطبع كلما كان متوسط عدد الفوتونات الواردة أكبر كلما تناقص احتمال عدم انتاج الكترونات عند إرسال واحدات وكلما كان معدل الخطأ أقل . توضح هذه المناقشة الطبيعة العامة لمنحنى تيار الظلام الصفري في الشكل (11 ـ 13) .

ان العشوائية في عدد الفوتونات الواردة وفي توليد الالكترونات هي مصدر تيار ضجيج الطلقات . ان تفسيرات الأخطاء المعتمدة على هذا السلوك الاحتمالي مباشرة أو على التيارات العشوائية الناتجة تكون متكافئة .

نورد فيما يلي مثالاً آخر . افترض ان تيار الظلام ينتج وسطياً $n_n=20$ الكتروناً لكل بتّة وانه يوجد وسطياً $n_s=10$ الكترونات ضوئية لكل بتّة . من المعادلة (11 ـ 32) تكون قيمة العتبة : $k_T=24.7$ وهكذا نضع تعداد العتبة عند : $k_D=25$. لاحظ انه يجب ان نضع العتبة فوق القيمة المتوسط لتعداد

الضجيج . يمكن ان تحدث أخطاء عندما يرسل النظام واحدات أو أصفار . وكما شرح سابقاً في هذا الفصل يوجد احتمال محدد بانه سيتولد أكثر بكثير من العدد المتوسط من الكترونات تيار الظلام (20 في هذا المثال) . وإذا أنتج 25 الكتروناً أو أكثر عندما يستقبل (0) فانه ينتج خطأ . وعندما يُستقبل (1) سيكون وسطياً $n_s+n_n=30$ الكتروناً لكل بتّة . وسيهبط هذا التعداد دون الـ 25 أحياناً مسبباً أخطاء . وبرفع العتبة نحو 30 سيجعل أكثر احتمالاً ان الواحدات الواردة سوف لن تنتج الكترونات كافية لكي تساوي العتبة أو تتجاوزها فتنتج أخطاء واحدات أكثر . وحينئذٍ تكون الأصفار أقل احتمالاً لتصل العتبة الجديدة . وعلى العموم تؤدي زيادة العتبة إلى زيادة أخطاء الواحدات فتنقص أخطاء الأصفار . وان إنقاص العتبة سينقص أخطاء الواحدات على حساب أخطاء الأصفار . وفي أي حال ان العتبة المثلى تنتج أخطاء أقل .

تظهر الآن سيئة الـPCM المحدد بضجيج الطلقات . يجب ان تعرف القدرة البصرية والضجيج من أجل وضع العتبة بالحالة المثلى . وحيث ان معدل الخطأ يتزايد بسرعة أثناء ابتعاد العتبة عن القيمة المثلى فان التحديد الدقيق للعتبة المثلى حرج .

يمكن تقريب منحنى تيار الظلام الصفري في الشكل (11 ـ 13) بالعلاقة التالية : $P_e=e^{-n_s}$ عندما تكون $n_s>2$. يبين الجدول (11 ـ 12) عدة قيم تم الحصول عليها من هذه المعادلة . ويمكن استعمال هذه النتيجة كنقطة مرجعية يمكن ان نقيس بدءاً منها جودة النظم الفعلية .

جدول (11ـ2)ـ معدلات خطأ الـ PCM التقريبية (بدون تيار ظلام)

P_e	n_s
10^{-1}	2.3
10^{-2}	4.6
10^{-3}	6.9
10^{-4}	9.2
10^{-5}	11.5
10^{-6}	13.8
10^{-7}	16.1
10^{-8}	18.4
10^{-9}	20.7
10^{-10}	23.0
10^{-11}	25.3
10^{-12}	27.6

مثال :

ترسل سلسلة نبضات 1 Mbps NRZ على نظام محدد بضجيج الطلقات عند $\lambda=0.82\ \mu m$ علماً أن للمستقبل تيار ظلام مهمل . كم عدد الفوتونات لكل بتّة التي يجب ان ترد على مكشاف ضوئي إذا كان معدل الخطأ المرغوب 10^{-4} بافتراض مردود كَمٍّ يساوي الواحد ؟ احسب القدرة البصرية الواردة . وقارن النتائج بالنظام المحدد بالضجيج الحراري الذي بحث سابقاً في هذا الفصل .

الحل :

نرى من الجدول (11 ـ 2) أن $n_s=9.2\simeq10$ الكترونات ضوئية لكل بتّة من أجل $P_e=10^{-4}$. وحيث ان مردود الكَمْ يساوي الواحد فاننا نحتاج إلى 10 فوتونات لكل بتّة وهذا أقل بكثير من الـ 600000 الضرورية في النظام المعادل المحدد بالضجيج الحراري . ان زمن البتّة هو $\tau=10^{-6}\ s$. وتكون القدرة البصرية من المعادلة (11 ـ 30) كما يلي: $P=hfn_s/\eta\tau=h\,cn_s/\eta\,\lambda\tau$ وهكذا تكون :

$$P = \frac{6.63\times10^{-34}\ (3\times10^{8})\ 10}{0.82\times10^{-6}\ (10^{-6})} = 2.4\times10^{-12}\ W = 2.4\ pW$$

ان القدرة المطابقة في النظام الحراري كانت 146 nW . وان النظام المحدد بضجيج الطلقات أكثر حساسية بمقدار :

$$10\ \log_{10}\left(\frac{146\ \times\ 10^{-9}}{2.4\ \times\ 10^{-12}}\right) = 48\ dB$$

يجب ان نلاحظ بدقة الانحدارات الحادة لمنحنيات الخطأ في الشكل (11 ـ 13) . ان تغيرات صغيرة في القدرة المتوفرة للمستقبل تنتج تغيرات كبيرة في احتمال الخطأ . تشجع هذه النتيجة على الحصول على نقل قدرة فعال .

بموجب الشكل (11 ـ 13) وحتى عندما يكون متوسط عدد الالكترونات الضوئية صفراً (قد يكون الليف مقطوعاً) فان احتمال الخطأ لا يساوي واحداً . وان معدل الخطأ الفعلي يساوي 1/2 . لماذا يكون هذا ؟ ان الجواب ببساطة هو أن مشاهداً عند طرف الاستقبال يستطيع أن يخمّن فيما إذا كان قد أرسل (1) أو (0) ويكون جوابه صحيحاً في 50٪ من الوقت عندما تكون الواحدات والأصفار متساوية (حسب العادة) . وبالطبع لا تنقل أية معلومات في هذه العملية .

(11 ـ 4) ـ مصادر ضجيج إضافية

يوجد نوعان مهمان من الضجيج لم نذكرهما بعد : ضجيج الأساليب وضجيج المكبر . سنرى كيف يظهران وكيف يمكن انقاص تأثيرهما حتى الحد الأدنى . وسنذكر أيضاً في هذه الفقرة بضعة أسباب أخرى للضجيج في نظام ليفي .

ضجيج الأساليب Modal Noise

ضجيج الأساليب هو تغير عشوائي في القدرة البصرية يحدث في ألياف متعددة الأساليب . إذا كان المنبع الضوئي متماسكاً بقوة (لنقل مثلاً : ثنائي ليزر

جيد) تتداخل أساليب الليف ببعضها وتشكل نمطاً ملطخاً (نمط بقع) . تكون البقع مضيئة عندما يكون التداخل الصافي للأسلوب جمعياً (حقول أساليب متفقة في الطور) وتكون مظلمة عندما يكون التداخل الصافي طرحياً (حقول أساليب مختلفة في الطور) .

ان المنبع غير المتماسك (مثل الـ LED) وبسبب عرض خطه العريض سوف لن يشكل نمط بقع . ولكي نوضح هذا يمكن ان نعتبر أن الطيف غير المتماسك يتألف من سلسلة من الموجات ذات الأطوال المتقاربة من بعضها . فينتج كل من أطوال الموجات هذه نمط بقع مختلفاً قليلاً. في المواقع التي تكون فيها بعض الأنماط مظلمة تكون أخرى مضيئة . ويكون النمط الكلي هو مجموع شدات البقع المنفردة وذلك لانه لا تتداخل الموجات ذات الأطوال المختلفة الواحدة بالأخرى . لذلك يكون النمط منتظماً (أو متغيراً ببطء) عبر المقطع العرضي لليف .



شكل (11 ـ 14) ـ نمطٌ ملطخ (نمط بقع) مكون من بقع مضيئة وأخرى مظلمة

لا تحتوي الألياف وحيدة الأسلوب على بقع حيث يحتاج ذلك أكثر من أسلوب لأن البقعة تمثل تداخلاً بين اثنين أو أكثر من الحقول .

ان البقعة ذاتها ليست موضع اعتراض . وعلى أية حال اعتبر ماذا يحدث عندما يزيح المنبع طول موجة خرجه (مثلاً بسبب تغير في درجة الحرارة أو بسبب التعديل كما ذكر في الفقرة 10ـ5). ان نمط التداخل الذي يعتمد شكله بدقة حرجة على طول الموجة سيتغير وستتحرك البقع المظلمة والبقع المضيئة إلى مواقع جديدة.تحدث إزاحة مشابهة إذا كان هناك حركة موضعية لليف وذلك لأن هذا يغيّر المسارات (والمسارات النسبية) للأساليب العديدة . إن تغيرات درجة الحرارة العشوائية المتواصلة أو الحركات الموضعية (اهتزاز) تولد إزاحة عشوائية متواصلة للبقع . حتى ان هذا التأثير ليس ضاراً في نظام بصري تام حيث يمكن

لمكشاف ضوئي موضوع عند نهاية الليف ان يجمع القدرة في الليف كلها وبسهولة بغض النظر عن النمط الخاص للضوء المنير . وعلى أي حال يكون لوصلة ليفية غير تامة مركبات ذات خسارات تعتمد على اختيارية الأسلوب. أي أن خساراتها تعتمد على نمط الضوء المنير . وان لمعظم الموصلات هذه الخاصة . مثلاً : موصـــل ذو عدم تراصف نواة بسيط (كما يبدو في الشكل 11 ـ 15) يتمتع بخسارة اختيار الأسلوب . تقرن أنماط بقعية مختلفة كميات مختلفة من الضوء عبر الوصلة ذات الخسارة ويعود هذا بكل بساطة إلى ان نمطاً مـا سيركّز ضوءاً ضمن الأجزاء المتراكبة للنواتين أكثر من نمط آخر . وأثناء تغير النمط فان بعضاً من البقع سيخرج (أو سيدخل) منطقة التراكب . ان النمط يتغير عشوائياً وسيبدو كخسارة موصل تتغير عشوائياً مع الزمن . ان التغير العشوائي الناتج في قدرة المستقبل هو ضجيج أساليب .



شكل (11 ـ 15) ـ نواتا ليفين غير متراصفتين .

إن إنقاص ضجيج الأساليب حتى الحد الأدنى سهل من الناحية النظرية : استعمل أليافاً وحيدة الأسلوب أو موصلات منخفضة الخسارة أو منابع ضعيفة التماسك . تزيد الألياف وحيدة الأسلوب والموصلات منخفضة الخسارة من كلفة النظام بينما تزيد المنابع ضعيفة التماسك انبساط النبضة العائد لتشتيت المادة (الفقرة 2 ـ 3) فتنقص سعة الليف في تداول المعطيات .

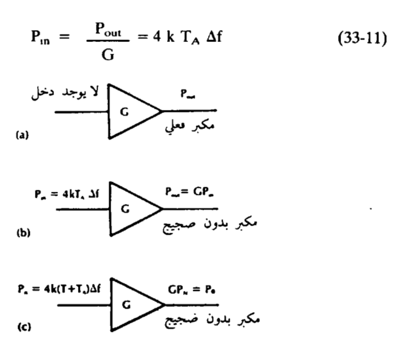
نستنتج من ذلك ان ضجيج الأساليب يجب ان يؤخذ في الحسبان عند تصميم نظام متعدد الأسلوب . ندرك على أية حال ان كمية ضجيج الأساليب ليس من السهل التنبؤ بها نظرياً لاننا لا نعرف عادة مدى عدم تراصف الموصل وانزياحات طول موجة المنبع . وان ضجيج الأساليب يجب ان يقيم تجريبياً .

ضجيج المكبر Amplifier Noise

يلي المكشاف الضوئي عادة مكبرٌ يقوي إشارة المستقبل إلى سوية مفيدة . وفي حالة مثالية تُضرب كل من قدرتي الإشارة والضجيج بمقدار ربح القدرة (G) للمكبر . وتساوي نسبة الإشارة إلى الضجيج عند خرج المكبر حينئذٍ تلك التي تكون عند المدخل ولسوء الحظ ان المكبرات الحقيقية لا تضاعف ضجيج الدخل فقط وإنما تنتج ضجيجاً خاصاً بها وهذا ما يخفض الـ SNR .

دعنا نمثل الضجيج المضاف بـ P_{out} وات . وإذا كنا نرغب أن نضيف هذه القدرة في حساباتنا لقيمة الـ SNR فاننا نستطيع ذلك بأن نأخذ مكبراً مثالياً (بدون ضجيج) وان نضيف عند مدخله منبع ضجيج حراري ينتج قدرة ضجيج : $P_{in}=P_{out}/G$ وات . نعرّف درجة حرارة ضجيج المكبر T_A الآن انها كالتي تنتج هذه القدرة أي باستعمال المعادلة (11 ـ 7) وكما يبينه الشكل (11 16) فتكون :

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{G} = 4\,k\,T_A\,\Delta f \qquad (33\text{-}11)$$



شكل (11 ـ 16) ـ ضجيج المكبر . (a) خرج الضجيج العائد للمكبر لوحده و (b) دارة الضجيج المكافئة التي تعرّف بـ T_A و (c) دارة ضجيج تتضمن الضجيج الناتج عن مقاومة الحمل .

وبجمع هذه المعادلة مع الضجيج الحراري لمقاومة الحمل تنتج قدرة ضجيج الدخل المكافئة الكلية وهي :

$$P_N = 4\ k\ (T+T_A)\ \Delta f = 4k\ T_e\ \Delta f \qquad (34\text{-}11)$$

حيث T هي درجة حرارة المقاومة وكذلك :

$$T_e = T + T_A$$

وهي درجة حرارة ضجيج النظام المكافىء . يَظهر الضجيج الحراري الفعلي وكأنه يَصدُر عن مقاومة تعمل عند درجة حرارة T_e .

نستطيع حساب الـ SNR الآن (باستعمال جميع المعادلات المستنتجة سابقاً) وذلك بأن نبدل ببساطة درجة حرارة النظام الفعلي T بدرجة حرارة الضجيج الفعال للنظام T_e . وبكلمات أخرى نفترض ان المكبر مثالي ونعتبر ان الضجيج يتراكم بزيادة درجة الحرارة الظاهرة لمقاومة الحمل .

مثال :

في مثال سابق وجدنا أن S/N=12(10.8 dB) من أجل نظام قدرة ثابتة محدد بالضجيج الحراري وكان عرض النطاق 10 MHz وكانت قدرة الإشارة المكشوفة 2×10^{-12} W وقدرة الضجيج الحراري $1\ 66\times10^{-13}$ W عند 300°K . افترض ان المكشاف الضوئي قد تلاه مكبر ذو ربح قدرة يساوي 10 dB ودرجة حرارة ضجيج 454°K . احسب الـ SNR .

الحل :

يعطى الضجيج منسوباً إلى طرفي مدخل المكبر بالمعادلة (11 ـ 34) حيث أن $T_e = T+T_A = 754°K$

$$P_N = 4k\ T_e\ \Delta f = 4\ (1.38\times10^{-23})\ (754)\ 10^7 = 4.2\times10^{-13}\ W.$$

وتكون :

$$\frac{S}{N} \qquad \frac{2\times10^{-12}}{4.2\times10^{-13}} = 4.8\ (6.8\ dB)$$

وحيث ان ضجيج المكبر قد تضمنته T_e فان هذه هي نسبة الإشارة إلى الضجيج في المخرج . ان الربح 10 dB يزيد كلاً من قدرة الإشارة الفعلية والقدرة الظاهرية للضجيج الحراري في المدخل بعامل مقداره 10 . يخفض ضجيج المكبر الـ SNR من 10.8 dB إلى 6.8 dB.

يعطى أحياناً ما يسمى رقم ضجيج المكبر F بدلاً من درجة حرارة ضجيجه T_A . F هي خاصية تعرّف بما يلي :

$$F = 1 + \frac{T_A}{T_S} \qquad (36\text{-}11)$$

حيث T_S هي درجة حرارة مرجعية . قد تم الاتفاق في عدة تطبيقات على ان تكون الدرجة 290°K كدرجة حرارة مرجعية . ان T_A لا تعتمد على اختيار المرجع إلا انه ليس هذا هو الحال بالنسبة لرقم الضجيج . يمكن تقديم تفسير لرقم الضجيج بسهولة . وتكون درجة حرارة ضجيج النظام المكافئة كما يلي :

$$T_e = T + T_A = T + (F - 1)\, T_S \qquad (37\text{-}11)$$

حيث قد حذفنا T_A باستعمال المعادلة (11 ـ 36) . افترض اننا نختار درجة الحرارة المرجعية مساوية إلى درجة حرارة النظام (T_S=T) تكون حينئذٍ T_e=FT وتصبح قدرة ضجيج الخرج الكلية ما يلي :

$$P_o = G\, P_N = G\, 4k\, T_e\, \Delta f = G\, 4k\, F\, T\, \Delta f \qquad (38\text{-}11)$$

وبحل المعادلة من أجل رقم الضجيج ينتج أن :

$$F = \frac{P_o}{G\, 4k\, T\, \Delta f} = \frac{P_o}{G\, P_{NT}} \qquad (39\text{-}11)$$

حيث كنا قد سمينا P_{NT} قدرة الضجيج الحراري لمقاومة الحمل من المعادلة (11 ـ 7) . تسمح لنا هذه النتيجة ان نعرّف رقم الضجيج بقدرة الضجيج الحراري عند الخرج مقسوماً على حاصل جداء ربح القدرة والضجيج الحراري عند المدخل . فلكي نستعمل هذا التعريف يجب قياس F (أو حسابها) عند درجة حرارة مقاومة الحمل . ومن أجل مكبر مثالي يكون : P_o=G P_{NT}

ويساوي رقم الضجيج الواحد . في الحقيقة تضيف جميع المكبرات ضجيجاً فيصبح $P_0 > G\,P_{N1}$ و $F > 1$.

مثال :

افترض اننا نريد معرفة قيمة F عند درجة حرارة النظام الفعلية 300°K . نجد حينئذٍ من المعادلة (11 ـ 36) أن :

$$F = \frac{1 + 454}{300} = 2.51$$

ويعبر عن رقم الضجيج غالباً بالديسيبل فيكون : $F_{dB} = 10 \log_{10} 2.51 = 4$ dB . تبين مقارنة الأمثلة القليلة المحلولة سابقاً ان مكبراً ذا رقم ضجيج يساوي 4 dB ينقص الـ SNR بنفس هذه الكمية . وفي الحقيقة من أجل الأنظمة المحددة بالضجيج الحراري سيخفض الـ SNR (بالديسيبل) دائماً برقم ضجيج المكبر (معبراً عنه بالديسيبل) إذا حسب رقم الضجيج عند درجة حرارة النظام الفعلية . ومن أجل الأنظمة المحددة بضجيج حراري يجب ان تحسب تأثيرات ضجيج المكبر على الـ SNR انفرادياً .

يمكن انقاص تأثيرات ضجيج المكبر حتى الحد الأدنى وذلك بتصميم مكبرات بأرقام ضجيج منخفضة . وحقيقي أيضاً ان الأنظمة المحددة بضجيج الطلقات تتأثر تأثيراً أقل بضجيج المكبر إذا بقي ضجيج الطلقات أكبر بكثير من الضجيج الحراري (عندما تكون درجة حرارة ضجيج المكبر مشمولة في حساب قدرة الضجيج الحراري) .

تتطلب الأنظمة الليفية المحددة بضجيج الطلقات عادة مستقبلات APD أو مستقبلات هيترودواينية حيث يمكن اعتبار كل منها مكبرات إشارة بدون ضجيج (يهمل الضجيج الفائض الجرفي) . يحدد الـ SNR لنظام يحتوي سلسلة من المكبرات قبل كل شيء بخصائص الضجيج للمكبر الأول . وهكذا نستنتج ثانية ان مستقبلاً بربح (APD أو هيترودايني) يعاني قدراً من تدهور الإشارة الناتج عن المكبر الالكتروني الأول أقل مما يعانيه مستقبل بدون ربح . نستنتج

أيضا ان المكبر الأول (المدعو المكبر المتقدم) في مستقبل بثنائي PIN هو الجهاز الأكثر حرجاً في تحديد الـ SNR النظام .

ضجيج الليزر Laser Noise

ان ضجيج الليزر هو تراوح عشوائي غير مرغوب فيه في خرج ثنائي ليزري يحدث حتى عندما يكون التيار القائد ثابتاً . انها خاصة ترافق الليزرات الضعيفة لكنها توجد فيها جميعاً تقريباً . يصل ضجيج الليزر إلى الذروة عند تعديل ثنائي عند تردد طنينه (يبلغ نموذجياً بضعة GHz) . لهذا السبب يكون الضجيج الليزري أكثر أهمية في الوصلات عالية التردد مما هو في الوصلات ذات التردد الأدنى . تقدم الثنائيات الليزرية جيدة البنية كميات صغيرة فقط من الضجيج إلى الأنظمة التي تعمل عند ترددات أقل من طنين الثنائي بكثيرة .

من أجل بعض الليزرات يصل الضجيج النسبي قيمة الذروة عند عتبة التذبذب . وعندما يتزايد التيار القائد ويتجاوز العتبة يبقى ضجيج الليزر ثابتاً بينما ترتفع قدرة الخرج بسرعة . وهكذا تهبط قدرة الضجيج النسبية وينتج تحسن في نوعية الإشارة . يخفض حتى الحد الأدنى مدى الإسهام في الضجيج بتشغيل الثنائي فوق العتبة بكثير (لنقل عند تيارات أكبر بـ 40٪ من العتبة) .

ضجيج التيار Current Noise

تنتج أجهزة أنصاف النواقل تياراً متأرجحاً ببطء يدعى ضجيج التيار أو ضجيج $1/f$. وهو مقصور على الترددات المنخفضة ويتغير وفق $1/f$ تحت 1 Hz . يمكن ان يخفض ضجيج التيار حتى الحد الأدنى بتمرير الإشارات المكبرة خلال مراشيح تمرير عالي حيث تخمد بشدة الترددات ما تحت حوالي 10 Hz .

ضجيج الخلفية Background Noise

في نظام اتصالات بصري جوي يمكن ان يدخل الضوء المكشاف الضوئي من مصادر غير المصدر المرغوب . ان طاقة من ضوء الشمس أو مصابيح الشارع

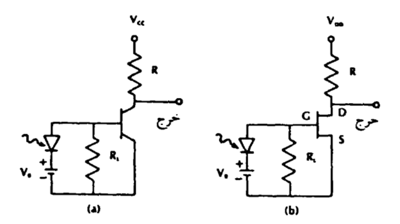
أو أضواء السيارات يمكن ان تُكشَف فتزيد التيار المستمر وتزيد بالنتيجة ضجيج الطلقات . يمكن إلغاء ضجيج الخلفية هذا بسهولة من وصلات الليف وذلك لأنها تكون عادة مغلقة كلياً .

(11 ـ 5) ـ تصميم دارة المستقبل Receiver Circuit Design

سنصف في هذه الفقرة دارة مُقدَّمَة المستقبل أي مجموعة الدوائر الأمامية للمستقبل (المكشاف الضوئي والمكبر الأول) بتفصيل أكثر مما وصف سابقاً . هناك طريقة ناجحة تتضمن مكبر جهد يستعمل اما ترانزستوراً ثنائي القطبية (Bipolar Transistor) أو ترانزستوراً ذا تأثير حقلي (FET) يلي مقاومة حمل المكشاف . وشبكتان أُخريان وهما المكبر ذو الممانعة العالية والمكبر ذو الممانعة العابرة تقدمان مزايا في بعض التطبيقات . سنصف الدارات المختلفة ونقارنها في البنود التالية :

مكبرات بترانزستور ثنائي القطبية وبترانزستور FET

ان الترتيب الأبسط لدارة المقدَّمَة يتألف من ثنائي ضوئي منحاز عكسياً منتهٍ بمقاومة حمل ويتبعه مكبر تقليدي كما يبينه الشكل (11 ـ 17) . يبين الشكل (a-17-11) مكبراً بترانزستور ثنائي القطبية ويبين الشكل (b-17-11) مكبراً



شكل (11 ـ 17) ـ دارات مقدَّمة بسيطة لمستقبل (a) ـ مكبر بترانزستور ثنائي القطبية و (b) مكبر FET .

بترانزستور FET . ومن أجل تبسيط الرسم لم تبين دارات انحياز الترانزستورين .

ان معايير اختيار مقاومة الحمل المثلى كانت قد قُدِّمت في الفقرة (7 ـ 4) ولُخِّصت في الجدول (7ـ3) . وبإيجاز نحتاج لـ R_L كبيرة للحصول على جهد كبير ولتخفيض الضجيج الحراري الا اننا نرغب بمقاومة R_L صغيرة من أجل عرض نطاق كبير ومدى ديناميكي واسع . ان عرض النطاق 3 dB الذي ورد سابقاً في المعادلة (7 ـ 16) يجب ان يتضمن الآن السعة والمقاومة المرتبطتين بالمكبر . ويكون حينئذٍ :

$$f_{3\text{-dB}} = \frac{1}{2\pi R_T C_T} \qquad (40\text{-}11)$$

حيث تمثل R_T مجموعة مقاومة الحمل R_L على التوازي مع مقاومة مدخل الترانزستور ومقاومة دارة الانحياز . و C_T هي مجموعة التوازي لسعة الثنائي C_d وسعة مدخل الترانزستور (وتبلغ بضعة بيكوفاراد كقيمة نموذجية) . يمكن ان تكون مقاومات الانحياز كبيرة بحيث لا تؤثر بربطها على التوازي مع R_L كثيراً على المقاومة الكلية R_T . ان مقاومة دخل الـ FET كبيرة (قيمة نموذجية من 1 MΩ إلى 100 MΩ ويمكن بالتالي إهمالها عند حساب R_T) . من أجل دارة مقدِّمة الـ FET يمكن ان نفترض أن $R_T=R_L$. ان مقاومة مدخل الترانزستور ليست كبيرة (بضعة كيلو أوم) . ويجب ان يتضمن حساب المقاومة الكلية قيمتها حيث انها يمكن ان تؤثر كثيراً على قيمة R_T وعلى عرض النطاق الناتج كما حسب من المعادلة (11 ـ 40) .

ان رقم الضجيج الذي عُرِّف في الفقرة السابقة يأخذ بالحسبان الضجيج الذي يُدخله الترانزستور (وشبكة انحيازه) ويسهم في تشكيل رقم ضجيج الـ FET الضجيج الحراري الذي تولده إيصالية قناة المنبع (S) ـ المصرف (D) وذلك الذي تولده مقاومات الانحياز . ينشأ ضجيج طلقات الـ FET من تيار التسرب الصغير بين البوابة G والمنبع S . ويصدر الضجيج الحراري في المكبر الترانزستوري ثنائي القطبية عن مقاومة قاعدة الترانزستور ومقاومة الانحياز .

ويشارك ضجيج الطلقات تياري المجمع والقاعدة في الترانزستور ثنائي القطبية .

تتزايد قدرة الضجيج التي يولدها ترانزستور FET وفق مكعب عرض نطاق النظام . بينما يتزايد الضجيج العائد للترانزســتور ثنائي القطبية وفق مربع عرض النطاق فقط (إذا كانت مقاومة القاعدة صغيرة كما هو الحال غالباً) . وهكذا عند ترددات مرتفعة (تطابق معدلات معطيات عالية في نظام رقمي) يقدم الترانزستور ثنائي القطبية ضجيجاً أقل مما يقدمه الـ FET وهو أفضل بهذا الخصوص .

وعند الترددات المنخفضة ينتج الـ FET ضجيجاً أقل ويكون أفضل من الترانزستور ثنائي القطبية . إضافة لما سبق فإن ربح ترانزستورات الـ FET يهبط كثيراً عند الترددات العالية فتتلاشى فائدتها بشدة في الأنظمة ذات السعة العالية . وبصورة عامة يقدم الـ FET، أفضل النتائج عند ترددات أقل من 25 MHz إلى 50 MHz أما الترانزستورات ثنائية القطبية فانها ذات أداء أفضل عند ترددات أعلى من هذا المدى .

المكبر ذو الممانعة العالية High Impedance Amplifier

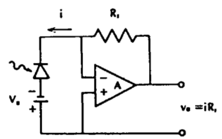
إذا جعلنا مقاومة الحمل R_L كبيرة من أجل مقدِّمة الترانزستور FET أو ثنائي القطبية فان ممانعة دخل المكبر (R_T على التوازي مع C_T) ستكون كبيرة ومنه التسمية، مكبر عالي الممانعة. وكما نعلم ان المقاومة الكبيرة تنقص الضجيج الحراري حتى الحد الأدنى . وهذا هو السبب في الحقيقة لتبنّينا للمقدِّمة ذات الممانعة العالية . وعلى أي حال تُنقِص R_L الكبيرة عرض نطاق المستقبل . ومن أجل ترددات أعلى من قيمة الـ 3 dB التي وردت في المعادلة (11 ـ 40) تحدد السعة C_T بشكل رئيسي ممانعة المدخل وتكامل شكل موجة الدخل . يعمل المكبر ذو الممانعة العالية فوق عرض نطاقه الـ 3 dB إلا انه يكبر الترددات الأعلى أقل بكثير مما يكبر الترددات الأدنى . وتعمل دارات تسوية موضوعة في مكان ما في المستقبل بعد المكبر المتقدم على عكس هذا التأثير بتخميدها الإشارة ذات

الترددات المنخفضة أكثر من الإشارة ذات الترددات المرتفعة وتنجز شبكة تفاضلية هذه النتيجة . تعيد المسوّيات مثالياً لموجة الإشارة شكلها الأصلي . ان الحاجة إلى المسوّيات هي الثمن الذي ندفعه للحصول على خواص ضجيج محسّنة للنهايات الأمامية ذات الممانعة العالية .

يجب ان ندرك ان المقدّمة عالية الممانعة لا تملك مدى ديناميكياً واسعاً وذلك بسبب مقاومة الحمل الكبيرة . وقد حلّت هذه المشكلة بواسطة المكبر ذي الممانعة العابرة الموصوف في الفقرة التالية . عندما يتطلب التطبيق مستقبلاً حساساً (ضجيجاً منخفضاً) ومدى ديناميكياً ضيقاً فقط فان مكبراً بمقدّمة عالية الممانعة يكون ملائماً .

المكبر ذو الممانعة العابرة Transimpedance Amplifier

ان مبدل التيار إلى جهد الموصوف في الفقرة (7 ـ 4) والمرسوم في الشكل (7 ـ 11) هو مكبر ذو ممانعة عابرة . وقد أعيد رسم دارته في الشكل (11 ـ 18) للإفادة . يعمل مكبر الممانعة العابرة على مدى ديناميكي واسع ويعالج الإشارات البصرية خطياً والتي تتفاوت سويات قدرتها بعشرات المرات لأن جهد الانحياز كله تقريباً يظهر على طرفي الثنائي حتى عندما تكون القدرة الواردة كبيرة بما فيه الكفاية لانتاج تيارات ضوئية كبيرة . لقد أوضح هذا السلوك في الشكل (7 ـ 12) وهو لا يماثل الوضع الموضح بالمعادلة (7 ـ 13) والشكل (7 ـ 8) حيث تحدّد القدرة البصرية العظمى من أجل كشف خطي بـ $V_B/\rho R_L$ ويكون التيار الضوئي الأعظمي V_B/R_L .



شكل (11 ـ 18) ـ مكبر ذو ممانعة عابرة . A هو مكبر عمليات و i هو التيار الضوئي للمكشاف بالإضافة إلى تيار الظلام .

تحدد مقاومة التغذية الراجعة الضجيج الحراري . وتحل R_F محل R_I في جميع حسابات الضجيج الحراري عند حساب الـ SNR لمقدَّمة المبكر ذي الممانعة العابرة . يجب ان تكون مقاومة التغذية الراجعة كبيرة كي تنقص الضجيج حتى الحد الأدنى ولتزيد جهد الخرج ($i R_F$) حتى الحد الأقصى . تحتوي شبكة التغذية الراجعة سعة توازٍ C_F تحد عرض النطاق حسب المعادلة التالية :

$$f_{3\text{-dB}} = \frac{1}{2\pi R_F C_F} \qquad (41\text{-}11)$$

وهذه المعادلة تشبه المعادلة (11 ـ 40) لدارات بدون تغذية راجعة . وعلى أي حال يمكن ان تكون سعة التغذية الراجعة أصغر بكثير من سعة مدخل الدارات C_T التي لا تحتوي تغذية راجعة . وهكذا يمكن ان تكون R_F أكبر من R_I من أجل عرض نطاق معلوم مما يزيد حساسية المستقبل وينقص الضجيج . وبطريقة مماثلة إذا كانت R_F تساوي R_L فان مقدَّمة المكبر ذي الممانعة العابرة سيكون لها عرض نطاق أكبر مما للمكبر بدون تغذية راجعة .

ان لمقدَّمة المكبر ذي الممانعة العابرة خصائص ضجيج تقارب تلك التي للمكبر عالي الممانعة منخفض الضجيج . وله مدى ديناميكي أوسع وعرض نطاق أكبر مما لشبكة الممانعة العالية . وإذا لاحظنا أيضاً ان دارات التسوية بصورة عامة غير مطلوبة فإننا ندرك لماذا يكون المكبر ذو الممانعة العابرة شائعاً في مستقبلات الألياف البصرية .

يلخص الجدول (11 ـ 3) الفروق بين دارات المقدَّمة الرئيسة . تذكر انه عندما يستعمل APD يكون الـ SNR أقل اعتماداً على الضجيج الحراري مما هو عندما يستعمل مكشاف PIN . وبكلمات أخرى فان الـ APD يحدد نسبة الإشارة إلى الضجيج وليس المكبر المتقدم . إذا كان هذا هو الحال فيجب على مصمم النظام ان يأخذ في اعتباره استعمال أبسط دارة مقدَّمة .

جدول (11 ـ 3) ـ مقارنة بين مقدَّمات مستقبل

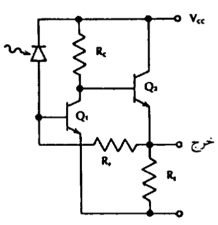
	ترانزستور ثنائي القطبية	ترانزستور FET	ممانعة عالية	ممانعة عابرة
تعقيد الدارة	بسيطة	بسيطة	معقدة	متوسطة
الحاجة لمسوّيات	كلا	كلا	نعم	كلا
الضجيج النسبي	متوسط	متوسط	منخفض جداً	منخفض
عرض النطاق	كبير	صغير	متوسط	كبير
المدى الديناميكي	متوسط	متوسط	ضيق	واسع

مكبر متقدم ـ مكشاف متكاملين Integrated Detector Preamplifier (IDP)

تحتوي المكبرات الكاشفة (المذكورة بإيجاز في الفقرة 7 ـ 3) نموذجياً على مكشاف ضوئي pn ومكبر ذي ممانعة عابرة أو ممانعة عالية وعلى مكبر لاحق واحد أو أكثر من أجل ربح إضافي ومواءمة الممانعة . يقدم الـ IDP فائدة بهذا الخصوص حيث يقدم لمصمم النظام مقدَّمة مصمَّمة ومجرَّبة ومبنية بشكل كامل . وأكثر أهمية من ذلك فانه يقلل إمكانية الالتقاط الكهربائي للإشارات الدخيلة بواسطة الأسلاك التي توصل بين المكشاف والمكبر . إن الأسلاك في الـ IDP قصيرة وسهلة الحجب . ان الضجيج الناشيء عند وصلة الثنائي مع المكبر يمكن ان يخفي الإشارة الصغيرة جداً والتي كانت قد نشأت وحُميت أثناء مسيرها من المنبع إلى القارن خلال الليف وقد مرت على عدة موصلات وشبكات توزيع على مسافة عدة كيلومترات من الليف إلى مكشاف حساس ومستقبل منخفض الضجيج . ان تأثر الـ SNR بالالتقاط الكهربائي أقل بكثير في المراحل المتأخرة من المستقبل حيث تكون الإشارة أقوى كثيراً .

يبين الشكل (11 ـ 19) رسم IDP بمكشاف ضوئي pn متراص . يكوِّن الترانزستوران Q_1 و Q_2 مع مقاومة التغذية الراجعة R_F مكبراً ذا ممانعة عابرة . يعمل التابع الباعثي (الترانزستور Q_2) كمنبع جهد صغير الممانعة . تبلغ ممانعة

الخرج Ω 20 وتبلغ الاستجابية 1.5 mV/μW . لاحظ ان استجابية IDP تربط جهد الخرج بقدرة الدخل البصرية . إن زمن الصعود (20 n sec) المقابل لعرض نطاق 3 dB محسوباً من المعادلة (7 ـ 2) هو 17.5 MHz .



شكل (11 ـ 9) ـ رسم مكبر متقدم ـ مكشاف متكاملين (IDP) .

وحدات مستقبلات هجينة Hybrid Receiver Modules

تقدم وحدات المستقبلات الهجينة الفوائد ذاتها التي تقدمها الـ IDP_s المتراصة . وتحتوي هذه الواحدات على دارتي ثنائي ضوئي ومكبر تُنتَجان بشكل منفصل وتوصلان بالتالي ضمن حيز صغير . يمكن ان يكون لمستقبل PIN-FET هجين مكشاف PIN موصل إلى مكبر FET (أو MESFET) ذي ممانعة عالية أو ذي ممانعة عابرة باستعمال مكونات دارة غشاء ثخين وطبقة تحتية من السيراميك . وتوضع الأجهزة الناتجة داخل بنى مناسبة مثل عبوة مزدوجة الخط شائعة الاستعمال في ألواح الدارة المطبوعة . يمكن ان يكون الاتصال البصري بالثنائي الضوئي بواسطة موصل أو ذيل ليفي ملحق بالعبوة .

(11 ـ 6) ـ الخلاصة :

يرافق الإشارات المستقبلة دائماً تراوحات عشوائية وذلك بسبب ضجيج الطلقات . ان الضجيج الحراري المرافق لمقاومة حمل المكشاف والضجيج

(حراري وطلقات) الذي تنتجه المكبرات يضافان إلى هذا الاضطراب . وبغية حل مشكلة الضجيج تُقدم بكل بساطة إشارة قوية للمستقبل وغالباً يمكن تحقيق ذلك في الوصلات القصيرة من نقطة إلى نقطة . وعندما يجب ان تجتاز الإشارة مساراً طويلاً أو تُقسَّم بين عدة نهايات فان الخسارات الحاصلة تخفض سوية الإشارة إلى الحد الذي يجب عنده أخذ الضجيج بالحسبان .

ان المقياسين العامين لنوعية الإشارة هما نسبة الإشارة إلى الضجيج واحتمال الخطأ . لقد أوضحنا في هذا الفصل وباستعمال أمثلة عددية نوعية ان للإشارات نوعية مقبولة حتى عندما تكون القدرة البصرية صغيرة إلى حد ما . سنعمم هذه النتائج قليلاً لنعطي القارىء شعوراً عن سويات القدرة المطلوبة وخسارات الوصلة المسموح بها . يمكن لبعض الأنظمة المحددة بالضجيج الحراري أن تعمل بشكل مرضٍ عندما يصل من القدرة البصرية إلى المستقبل حوالي 1 μW (‎−30 dBm) . ويمكن لأنظمة مماثلة محددة بضجيج الطلقات ان تعمل عند سويات النانو وات (‎−60 dBm) وإذا كان المنبع يبث 10 mW (10 dBm) يمكن ان يسمح بخسارة نظام كلية مقدارها 40 dB (10+30) في النظام المحدد بالضجيج الحراري و 70 dB (10+60) في النظام المحدد بضجيج الطلقات . يجب ان ندرك على أية حال ان النتائج المثالية للنظام المحدد بضجيج الطلقات من الصعب الحصول عليها عملياً . تسمح الـ APD_s للأنظمة بالاقتراب من هذه النتائج المثالية بحوالي 10 dB . وعلى الرغم من ذلك فان مستقبلاً يصل إلى حدود 10 dB من الحالة المثالية سيكون أكثر حساسية من المستقبل المحدد بالضجيج الحراري بحوالي 20 dB .

عندما يكون الضجيج مشكلة يجب الاهتمام بتصميم المستقبل اهتماماً كبيراً . يبتدىء التصميم باختيار المكشاف الضوئي . ويُختار ثنائي PIN إذا كان العمل المحدد بالضجيج الحراري يعطي جودة إشارة كافية ويُختار APD إذا كان يجب تحسين الإشارة . إن الكلفة وتعقيد الدارة المرافقين للـ APD يجعلان تنقيص خسارات النظام قدر الإمكان أمراً مرغوباً (ربما بتحسين مردود المنبع واقتران الموصل) قبل استخدام APD . ان تنوع دارات المكبر المتقدم المتوفرة (مثلاً : المقدِّمات ذوات الممانعة العالية وذوات الممانعة العابرة والمكبرات إضافة

للمكاشيف عند النهاية) تعطي المصمم مرونة من أجل الوصول إلى الحالة المثلى للمكبر على أساس الكلفة أو التعقيد أو الأداء .

إن صفات الجودة المهمة في المستقبل هي الحساسية وعرض النطاق والمدى الديناميكي . تستطيع المستقبلات الحساسة كشف الإشارات الضعيفة جداً وزيادة المسافات المسموح بها بين المكررات وأطوال المسارات وتقدم استقبالاً عالي الجودة . وتسمح أيضاً بتقسيم القدرة بين عدة نهايات في شبكة موزَّعة . تزيد المستقبلات ذات عرض النطاق الكبير سعة النظام . فتسمح باستقبال معلومات أكثر . وتعمل المستقبلات ذات المدى الديناميكي الواسع بشكل مرضٍ حتى عندما تتغير القدرة البصرية المستقبلَةُ بشكل كبير . ان هذا مطلب في شبكات الاتصالات الموزَّعة حيث تكون فيها الإشارات من المرسِلات المجاورة أقوى بكثير من الإشارات التي تصل من المرسلات الأكثر بعداً .

إن شبكات معالجة الإشارة التي تلي مقدَّمة المستقبِل تشمل دارات تعمل كمكاملات ومفاضلات ومسوّيات ومقارنـات ومكاشيف ذروة ومكبرات قدرة . انها أجهزة الكترونية تقليدية وليست خاصة بوصلات الألياف البصرية ولا يغطيها هذا الكتاب بشكل مفصل .

مسائل الفصل الحادي عشر

11 ـ 1 ـ تبلغ درجة الحرارة 35°C وعرض النطاق 6 MHz ومقاومة الحمل 50 Ω والمطلوب :

أ ـ حساب القيمة الفعالة لتيار الضجيج الحراري .

ب ـ حساب القيمة الفعالة لجهد الضجيج الحراري الذي يظهر على طرفي المقاومة وقدرة الضجيج الحراري المتولدة .

ت ـ كرِّر هذه المسألة إذا تغيرت المقاومة إلى 50,000 Ω .

11 ـ 2 ـ يبلغ عرض نطاق المستقبل 6 MHz والتيار الضوئي الوسطي 1 nA ودرجة الحرارة T=300 K وتيار الظلام صفراً ومقاومة الحمل 50 Ω .

أ ـ احسب القيمة الفعالة لتيار ضجيج الطلقات .

ب ـ احسب القيمة الفعالة لجهد الإشارة ولجهد ضجيج الطلقات على طرفي المقاومة .

ت ـ احسب نسبة الإشارة إلى الضجيج مهملاً الضجيج الحراري .

ث ـ كرِّر الجزء ت دون اهمال الضجيج الحراري .

11 ـ 3 ـ تيار ظلام مكشاف ضوئي 5 nA واستجابيته 0.5 A/W . عند أي قيمة للقدرة البصرية يتساوى ضجيج الطلقات المولد بالإشارة مع ضجيج الطلقات المولد بتيار الظلام ؟

11 ـ 4ـ استجابية مكشاف ضوئي PIN هي 0.5 A/W وتيار ظلامه 2 nA . مقاومة الحمل 2000 Ω وعرض نطاق النظام 50 MHz ودرجة الحرارة 40°C .

أ ـ عند أي قيمة للقدرة البصرية المستقْبَلة يكون الضجيج الحراري مساوياً لضجيج الطلقات ؟

ب ـ ما هي نسبة الإشارة إلى الضجيج عند سوية القدرة هذه ؟

ت ـ ما هي قيمة قدرة ضجيج الطلقات عند هذه القيمة للقدرة البصرية المستقبَلة ؟

11 ـ 5 ـ كرِّر المسألة (11 ـ 4) إذا كان المكشاف الضوئي من النوع الجرفي (APD) ذي ربح 100 وتيار ظلام غير مكبر 2 nA .

11 ـ 6 ـ تبلغ القدرة البصرية التي تصل المستقبل 1 μW ، واستجابية المكشاف 0.5 A/W وتيار الظلام له 4 nA ودرجة الحرارة 27°C وعرض نطاق المستقبل 500 MHz ومقاومة الحمل 50 Ω .

أ ـ احسب نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR) .

ب ـ احسب نسبة الإشارة إلى الضجيج المحدودة بالضجيج الحراري .

ت ـ احسب نسبة الإشارة إلى الضجيج المحدودة بضجيج الطلقات .

ث ـ ما قيمة ربح المكشاف الضوئي المطلوبة لتجعل الـ SNR الفعلية أقل من حد الكَمْ بـ 5 dB فقط ؟ افترض ان الضجيج الزائد للمكشاف الضوئي مهمل .

11 ـ 7 ـ استجابية مكشاف ضوئي PIN هي 0.3 A/W وتيار الظلام له 10 nA . ودرجة الحرارة 300 K وعرض النطاق 100 MHz .

أ ـ ارسم بيانياً الـ NEP مقابل مقاومة الحمل كالمبين في الشكل (11 ـ 9) .

ب ـ احسب القدرة البصرية الدنيا التي يمكن كشفها عندما تكون مقاومة الحمل 50 Ω .

ت ـ كرِّر الجزء ب من أجل مقاومة حمل 5000 Ω .

ث ـ كرِّر الجزء ب من أجل مقاومة حمل 50,000 Ω .

11 ـ 8 ـ نظام تماثلي ذو عرض نطاق 10 MHz ومكشافه الضوئي ذو استجابية 0.5 A/W (بدون ربح) وتيار ظلام يساوي 1 nA و SNR تساوي 50 dB عندما يكون عامل التعديل البصري 0.4 . درجة حرارة المستقبل 27°C ومقاومة الحمل 50 Ω . ما هو متوسط القدرة البصرية التي يجب ان تصل المستقبل ؟

11 ـ 9 ـ اعتبر مستقبلاً هيترودايناً لنظام رقمي . المكشاف الضوئي ذو تيار ظلام 2 nA واستجابية 0.5 A/W . درجة الحرارة 27°C ومقاومة الحمل 100 Ω وعرض نطاق الـ IF 500 MHz وقدرة الإشارة البصرية المستقبلة ثابتة عند 5 nW عند استقبال (1) ثنائي .

أ ـ ما هي قدرة المتذبذب المحلي المطلوبة لكي تجعل الـ SNR أقل من حد الكَمْ بـ 1 dB فقط .

ب ـ إذا لم يكن النظام هيترودايناً سيكون عرض نطاقه 250 MHz . حدِّد قدرة الإشارة المطلوبة للحصول على SNR مساوية لتلك المحسوبة في الجزء ـ أ ـ.

11 ـ 10 ـ وسِّع جدول تابع الخطأ (الجدول 11 ـ 1) من x=3 إلى x=6 بخطوات قيمتها 0.5 .

11 ـ 11 ـ نظام PCM محدود بالضجيج الحراري يعمل باحتمال خطأ أفضل من 10^{-9} . مقاومة الحمل 50 Ω ودرجة الحرارة 300 K ومعدل المطعيات

(NRZ) 500 Mbps وطول الموجة 1.3 μm وكفاءة الكم للمكشاف الضوئي 0.9 .

أ ـ ما هي قيمة SNR الدنيا المطلوبة ؟

ب ـ ما مقدار القدرة البصرية التي يجب ان تصل المستقبل ؟

ت ـ احسب عدد الفوتونات الواردة لكل بتّة (أي عدد الفوتونات عند استقبال 1) عند سوية القدرة هذه .

11 ـ 12 ـ نظام PCM محدود بضجيج الطلقات وذو معدل معطيات 500 Mbps يعمل باحتمال خطأ أفضل من 10^{-9} . طول الموجة 1.3 μm وكفاءة الكم للمكشاف الضوئي 0.9 وتيار الظلام مهمل .

أ ـ ما مقدار القدرة البصرية التي يجب ان تصل المستقبل ؟

ب ـ احسب عدد الفوتونات الواردة لكل بتّة عند سوية القدرة هذه .

ت ـ قارن نتائج هذه المسألة بنتائج المسألة 11 ـ 11 .

ث ـ يحتمل انك قد وجدت ان النظام المحدود بالكم قد تَطلّب قدرة أقل بكثير من النظام المحدود حرارياً . كيف يمكن تصميم النظام لكي يقارب النتيجة المحدودة بالكم ؟

11 ـ 13 ـ مكبر ذو ربح قدرة 8 ورقم ضجيج 3 dB . هذا المكبر يتلو مكشافاً ضوئياً ذا استجابية 0.5 A/W . مقاومة الحمل 100 Ω والقدرة البصرية المستقبلة 0.5 μW ودرجة الحرارة 300 K وعرض نطاق المستقبل 1 MHz .

أ ـ احسب قدرة الإشارة المتدفقة خلال المقاومة .

ب ـ احسب قدرة الإشارة التي تخرج من المكبر .

ت ـ احسب قدرة الضجيج الحراري المولّد بواسطة مقاومة الحمل .

ث ـ احسب قدرة الضجيج الحراري الذي يخرج من المكبر .

ج ـ احسب درجة حرارة ضجيج المكبر .

ح ـ احسب قدرة ضجيج الدخل المكافىء .

خ ـ احسب الـ SNR عند مدخل المكبر .

د ـ احسب الـ SNR عند مخرج المكبر .

11 ـ 14 ـ يتألف مستقبل بصري من مكشاف ضوئي PIN ومن مكبر FET كما في الشكل (11 ـ 17) . مقاومة الحمل 2000 Ω وسعة الثنائي 3 pF وسعة الترانزستور 6 pF .

أ ـ احسب عرض نطاق الـ (3-dB) لهذا المستقبل .

ب ـ احسب زمن الصعود التقريبي لهذا المستقبل .

11 ـ 15 ـ كرِّر المسألة (11 ـ 14) إذا حل محل الـ FET ترانزستور ثنائي القطبية ذو سعة مدخل 6 pF ومقاومة مدخل 2000 Ω . قارن نتائج هذه المسألة بنتائج المسألة (11 ـ 14) .

11 ـ 16 ـ ارسم دارة مستقبل بترانزستور ثنائي القطبية مثل المبين على الشكل (a-17-11) متضمنة شبكة انحياز . أوضح (بالشرح أو بالرسم) كيف تعمل دارتك ؟

11 ـ 17 ـ كرِّر المسألة (11 ـ 16) من أجل المستقبل FET المبين في الشكل (b-17-11) .

11 ـ 18 ـ اعتبر المستقبل البصري ذا مكبر بممانعة عابرة كالمرسوم في الشكل (11 ـ 18) . مقاومة التغذية الراجعة 10 kΩ وسعتها 0.2 pF وسعة الثنائي 50 pF واستجابيته 0.5 A/W والقدرة البصرية الواردة 0.5 μW .

أ ـ احسب جهد خرج المستقبل .

ب ـ احسب عرض نطاق الـ (3-dB) للمستقبل .

ت ـ احسب تيار الضجيج الحراري الفعال المتولد في مقاومة التغذية الراجعة بافتراض ان درجة الحرارة 300 K .

ث ـ احسب تيار الإشارة .

ج ـ بافتراض عدم وجود تيار ظلام وان رقم ضجيج المكبر يساوي 4 dB احسب SNR المخرج .

المراجع

الفصل الحادي عشر

1. Amnon Yariv. *Introduction to Optical Electronics*. 2d ed. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1976. pp. 282-87.
2. Ibid. pp. 280-282.
3. Tien Pei Lee and Tingye Li. "Photodetectors." In *Optical Fiber Telecommunications,* edited by Stewart E. Miller and Alan G. Chynoweth. New York: Academic Press, Inc., 1979. pp. 608-621.
4. R. J. McIntyre. "Multiplicaion Noise in Uniform Avalanche Diodes. "*IEEE Trans. Electron Devices* 13, no. 1 (January 1966): 164-68.
5. Gerd Keiser. *Optical Fiber Communications*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1983. pp. 161.63.
6. Michael Ettenberg and Gregory H. Olsen. "Diode Lasers for the 1.2 to 1.7 Micrometer Region." *Laser Focus* 18, no. 3 (March 1982): 61-66.
7. Yariv. *Introduction to Optical Electronics*. pp. 292-95.
8. Milton Abramovitz and Irene A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions,* Wachington, D.C.: United States Department of Commerce, 1964. pp. 295-329.
9. Jiam K. Pratt. *Laser Communication System*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1989. pp. 196-99.
10. Chown, A. W. Davis, R. E. Epworth, and Farrington. "System Design." In *Optical Fiber Communication Systems,* edited by C. Sandbank. Chichester: John Wiley & S Ltd., 1980. pp. 549-65.
11. A. Kirkby. "Semiconductor Laser Sources For Optical Communication. "*Inst. Electron. Radio Engr.* 51, no. 7/8 (July/August 1981): 392-76.
12. Pratt. *Laser Communication Systems*. pp. 152-53.
13. R. G. Smith and S. D. Personick. "Receiver Design for Optical Fiber Communication Systems." In *Semiconductor Devices for Optical*

Communication, edited by H. Kressen. Berlin: Springer-Verlag, 1980. pp. 89-160.

14. Stewart D. Personick, *Optical Fiber Transmission Systems.* New York: Plenum Press, 1981. pp. 57-98.
15. *Motorola Optoelectronic Device Data.* Phoenix, Arizona: Motorola, Inc., 1980.

الفصل الثاني عشر

تصميم النظام
System Design

ابتدأ هذا الكتاب بمناقشة بصريات الليف من وجهة نظر واسعة للأنظمة . لقد عرّف المخطط الإجمالي في الشكل (1 ـ 3) المكونات الرئيسة ومواقعها ضمن النظام . وقد قدم الوصفُ المرافق الغايةَ من كل مكوِّنة بمصطلحات عامة . وقد عالجت الفصول التالية التفاصيل النظرية وتصميم وعمل وخواص المكونات الافرادية . سنجمع الآن المكونات مع بعضها ونرى كيف ان سلوكياتها الافرادية تؤثر على أداء النظام الكلي . وهكذا سنكون قد بلغنا الغاية في معالجتنا للأنظمة الليفية .

(12 ـ 1) ـ تصميم نظام تماثلي Analog System Design

في نظام ليفي يجب ان تكون خسارات المكونات المجمَّعة صغيرة بما فيه الكفاية لكي نضمن وصول قدرة كافية إلى المستقبل . من أجل نظام تماثلي ، ان التعبير ـ قدرة كافية ـ يعني الكمية من القدرة التي تنتج نسبة إشارة إلى ضجيج معينة . وكمطلب إضافي يجب ان يكون للمكوِّنات المجمَّعة عرض نطاق كافٍ لتمرير أعلى ترددات تعديل تحتويها الإشارة البصرية . لقد ناقشنا حتى هذه

النقطة خسارات الجهاز الافرادية وعروض النطاق . وسنبحث الان كيف تعمل مع بعضها وسنفعل هذا بالعمل من خلال مشكلة تُعرض كعيّنة توضح حساب القدرة وعرض النطاق .

مواصفات النظام System Specification

سنصمم نظاماً فيديوياً من نقطة إلى نقطة بسيطاً نسبياً . تستطيع هذه الوصلة ان تسلم إشارات من ستوديو تلفزيوني إلى مرسل بعيد . يمكن للوصلة ان تخدم كذلك كجزء من جهاز مراقبة أمنية ذي دارة مغلقة في بناء أو في حرم الجامعة . ويتطلب ذلك أطوال مسارات تبلغ حوالي نصف كيلومتر .

ومن أجل التبسيط سنستعمل الإشارات التي تولدها الكاميرا التلفزيونية لتعديل شدة المنبع الضوئي . تغطي الإشارات عرض نطاق يبلغ 6 MHz تقريباً . من أجل الحصول على صورة واضحة تحدد نسبة إشارة إلى ضجيج بقيمة 50 dB $(S/N=10^5)$.

تستعمل أبسط الأنظمة أليافاً متعددة الأسلوب (أما SI أو GRIN) مع ثنائيات LED تبث في المدى من $0.8\ \mu m$ إلى $0.9\ \mu m$ ومكاشيف ضوئية PIN سيليكونية . إذا لم يكن لهذه المكونات عرض نطاق كاف ولا تقدم قدرة كافية علينا ان نستعمل ثنائيات ليزرية ومكاشيف ضوئية جرفية وأليافاً وحيدة الأسلوب ومنطقة النافذة الثانية ذات طول الموجة الأطول .

تطبق الـ SNR المعطاة بالمعادلة (11 ـ 24) . وسنفترض 100٪ نسبة تعديل . ومن أجل تقويم هذه المعادلة نحتاج إلى قيمة من أجل مقاومة حمل المكشاف R_L . سنفترض ان لثنائي PIN سعة مقدارها 5 PF واستجابية مقدارها 0.5 A/W عند $0.85\ \mu m$. تحدد قيمة R_L العظمى من المعادلة (7 ـ 16) بافتراض تردد قطع مقداره 6 MHz فتكون كما يلي :

$$R_L = (2\pi\ C_d\ f_{3\text{-}dB})^{-1}$$

$$R_L = [2\pi\ (5\times10^{-12})\ (6\times10^{6})]^{-1} = 5305\ \Omega$$

سنختار $R_L=5100\ \Omega$ من أجل الحسابات التالية . ليس من الحكمة ان نضع $R_L=5305\ \Omega$ لأن المكشاف الضوئي سيستهلك حينئذٍ ميزانية عرض النطاق كلها . يجب ان نسمح أيضاً ببعض التدني في عرض نطاق الإشارة العائدة إلى المنبع والليف . وسنقوِّم التأثيرات المجتمعة لعرض النطاق قريباً .

ميزانية القدرة Power Budget

حيث اننا نستعمل ثنائي PIN فاننا نتوقع نظاماً محدداً بالضجيج الحراري . سنتابع وفق هذا الافتراض وسنتحقق منه بعد أن تكون القدرة المستقبلة قد حسبت . وبهذا الافتراض تبسط المعادلة (11 ـ 24) إلى :

$$\frac{S}{N} = \frac{0.5\ R_L\ (\rho\ P)^2}{4k\ T\ \Delta f} \qquad (1\text{-}12)$$

حيث : $\rho=\eta e/hf$ هي استجابية الثنائي PIN . لنفترض درجة حرارة محيط 300°K ورقم ضجيج المكبر المتقدم (3 dB) 2 . ان درجة الحرارة المكافئة $T_e=FT=600°K$ يجب ان تستعمل في المعادلة السابقة . وبحل المعادلة من أجل القدرة البصرية المتوسطة المطلوبة عند المستقبل نحصل على ما يلي :

$$P = \sqrt{\left[\frac{4\ (1.38\times10^{-23})\ (600)\ (6\times10^{6})\ (10^{5})}{0.5\ (0.5)^2\ (5100)}\right]} = 5.6\ \mu W$$

ويدوّر هذا الرقم إلى $6\ \mu W$ من أجل السهولة . وعند سوية القدرة هذه يولد الثنائي PIN تياراً متوسطاً : $I=\rho P=3\ \mu A$. وهذا أكبر بكثير من تيارات الظلام لثنائي PIN نموذجي والتي تبلغ بضعة نانو أمبير . لذلك يمكن تجاهل تيار الظلام في هذا النظام . تبين المعادلتان (11 ـ 1) و(11 ـ 2) ان قدرة الضجيج الحراري أكبر بـ 7 مرات من قدرة ضجيج الطلقات مما يؤكد صحة شكنا البدائي ورغبتنا بان يكون لدينا نظام محدد بالضجيج الحراري .

يجب ان نتحقق من أن التيار المتوقع وهو $3\ \mu A$ لا يقود المكشاف إلى العمل في المنطقة غير الخطية . وكما أشير إليه في الشكل (8 ـ 7) فان التيار

الأعظمي قبل الإشباع يساوي نسبة جهد الانحياز على مقاومة الحمل . وباستعمال جهد انحياز قدره 5 V نحصل على تيار أعظمي مسموح به يساوي : $5/5100=980\ \mu A$ وهو أكبر بكثير من قيمة تيار التشغيل الذي هو فقط $3\ \mu A$. ولا يشكل الإشباع مشكلة في هذا النظام .

سنتابع التصميم بافتراض ان المكونات المتوفرة لها المواصفات التالية :

1 ـ منبع الضوء : LED باعث سطحي يشع 1 mW عند $0.85\ \mu m$. وزمن صعوده 12 ns وعرض طيفه 35 nm وقطر سطحه الباعث أقل من $50\ \mu m$.

2 ـ ليف SI متعدد الأساليب : له $NA=0.24$ وعرض نطاق بصري $f_{3\text{-}dB}\times L=33\ MHz\times km$ وخسارة 5 dB/km وقطرة نواة $50\ \mu m$.

3 ـ ليف GRIN متعدد الأساليب : له $NA=0.24$ (محورية) وعرض نطاق بصري $f_{3\text{-}dB}\times L=500\ MHz\times km$ (إذا كان المنبع ثنائي ليزر) وخسارة 5 dB/km وقطر نواة $50\ \mu m$.

تعالج ميزانية القدرة بسهولة بكتابة سويات القدرة بالـ dBm . يبث المنبع 0 dBm (1 mW) ويتطلب المستقبل -22.2 dBm ($6\ \mu W$) .

وهكذا يجب الا تكون خسارات المكونات مجتمعة أكثر من 22.2 dB . ان خسارة اقتران المنبع مع ليف SI هي : $\eta=NA^2=0.0576$ (12.4 dB) ووفق المعادلة (8 ـ 12) فان خسارة الاقتران مع ليف GRIN أسوأ بمقدار 3 dB . وتكون الخسارة في هذه الحالة 15.4 dB . يوجد خسارة انعكاس 0.2 dB عند الدخول إلى الليف وعند المخرج . وبافتراض ان هناك حاجة لموصلين فقط (واحد عند المرسل وواحد عند المستقبل) وخسارة كل موصل 1 dB فتضاف خسارة مقدارها 2 dB . وهذا يترك 7.4 dB ($22.2-12.4-0.4-2=7.4$ dB) من أجل خسارة ليف مسموح بها لـ SI و 4.4 dB لـ GRIN . وعند خسارة ليف 5 dB/km يحدد التخامد أطوال ليف SI بأقل من $7.5/5=1.48$ km . ستترك وصلة SI بطول 1 km احتياطاً مقداره 2.4 dB ومن أجل ليف GRIN يكون طول الوصلة الأعظمي $4.4/5=0.88\ km=880\ m$.

ميزانية عرض النطاق Bandwidth Budget

سنفحص ثانية قيود عرض النطاق عند جمع المنبع والليف والمكشاف . وعند هذه النقطة يمكن ان ندرك ان بعض معطيات الاستجابة قد أعطيت بدلالة زمن الصعود (مثلاً : زمن صعود الـ LED الذي قيمته 12 ns) وقد أعطي بعضها بدلالة عرض النطاق (مثلاً : عرض نطاق النظام الذي قيمته 6 MHz) . سنبدل جميع المعطيات إلى أزمان صعود مكافئة . سنلجأ إلى اتخاذ قيم تقريبية وذلك لانه لا زمن الصعود ولا عرض النطاق يصف أي منهما خواص العنصر تماماً . (ان الاستجابة النبضية تصف تماماً خواص العنصر وعلى أي حال لا تكون الاستجابة النبضية عادة معروفة ومن الصعب الحصول عليها تجريبياً وفي حال الحصول عليها فمن الصعب استعمالها) . ان زمن الصعود وعرض النطاق يعطيان معلومات كافية من أجل تصميم بدائي للنظام . ويعطى احدهما عادة على صفحات المعطيات ومن السهل استعمالها .

ان أزمان الصعود t_S و t_{LS} و t_F و t_{PD} لكل من النظام والمنبع الضوئي والليف والمكشاف الضوئي على التتالي ترتبط ببعضها بالعلاقة التالية :

$$t_S^2 = t_{LS}^2 + t_F^2 + t_{PD}^2 \qquad (2\text{-}12)$$

سنفترض أن المعادلة (7 ـ 2) تحول عرض النطاق إلى زمن صعود للنظام ولليف بشكل صحيح . وسنطبقها فيما يلي بشيء من العناية على أي حال . ان زمن صعود النظام يكون حينئذٍ : $t_S = 0.35/6\times10^6 = 58.3$ ns . ومن المعادلة (15 ـ 7) : $t_{PD} = 2.19\ R_L\ C_D = 2.19\ (5100)\ (5\times10^{-12}) = 55.8$ ns . وهذا أكبر بكثير من حد زمن العبور النموذجي الذي قيمته 1 ns وهكذا يكون المكشاف محدداً بشروط الدارة . في هذا المثال يستهلك المستقبل معظم ميزانية زمن الصعود . ويمكن تغيير هذا بتخفيض R_L (الذي سيخفض بالتالي حساسية المستقبل فنحتاج إلى قدرة أكبر) . إن زمن صعود الـ LED هو 12 ns . وبموجب المعادلة الأخيرة يجب ألا يكون زمن صعود الليف (بالنانو ثانية) أكبر مما هو معطى بحل المعادلة التالية :

$$t_F^2 = t_S^2 - t_{LS}^2 - t_{PD}^2 = 58.3^2 - 12^2 - 55.8^2 = 141$$

فنحتاج بالتالي إلى $t_F \leqslant 11.9$ ns .

سنبتعد عن الموضوع الرئيسي لحظة قبل متابعة حسابات طول الليف المسموح به المؤسَّس على عرض نطاقه . ان عرض النطاق 3 dB المستعمل في المعادلة (7 ـ 2) هو التردد الذي تهبط عنده القدرة الكهربائية في دارة ما إلى نصف قيمتها العظمى . وعلى أي حال عند حساب عرض نطاق الألياف كنا قد استعملنا النقص في القدرة البصرية . مثلاً : ان عرض النطاق 3 dB لليف يقابل نقصاً في القدرة البصرية المعدَّلة بمقدار النصف . اعتبر قياس عرض النطاق البصري 3 dB . يبدأ تردد التعديل صغيراً ويقيس مكشاف ضوئي اتساع التيار الجيبي المستقبَل . ويسجَّل هذا الاتساع ويستعمل كمرجع . ويزداد تردد التعديل الآن بينما يراقب التيار المكشوف . وحيث ان التيار يتناسب مع القدرة البصرية فاننا نعلم انه قد تم الوصول إلى التردد المقابل إلى 3 dB عندما يهبط التيار إلى نصف القيمة المرجعية . وعلى أي حال وحيث ان القدرة في مقاومة حمل المكشاف تتناسب مع مربع التيار فان نقصاً بقيمة النصف في التيار يطابق هبوطاً إلى ربع القدرة الكهربائية . هذه هي خسارة قدرة كهربائية بقيمة 6 dB . لقد وجدنا للتو ان عرض النطاق البصري 3 dB يطابق عرض نطاق كهربائي 6 dB . وعلى العموم ان الخسارة الكهربائية هي ضعف الخسارة البصرية وكلاهما مقاس بالديسيبل . يؤكد الجدول (12 ـ 1) هذه النقطة

جدول (12 ـ 1) ـ الخسارة الكهربائية مقابل الخسارة البصرية

الخسارة البصرية (dB)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3
الخسارة الكهربائية (dB)	0	1	2	3	4	5	6

أما الآن ولكي نستعمل المعادلة (7 ـ 2) من أجل الليف يجب ان نجد عرض النطاق الكهربائي لليف 3 dB . وكما يشير إليه الجدول (12 ـ 1) فإن

هذا يقابل التردد الذي عنده تنقص القدرة البصرية بمقدار 1.5 dB فقط . ومن خواص الخسارة المعطاة بالمعادلة (3 ـ 17) نجد أن :

$f_{1.5\,dB}=0.71\ f_{3\text{-}dB}$. وهكذا يرتبط عرضا النطاق 3 dB البصري والكهربائي بالعلاقة التالية :

$$f_{3\text{-}dB}\ (\text{كهربائي}) = 0.71\ f_{3\text{-}dB}\ (\text{بصري}) \qquad (3\text{-}12)$$

فمن أجل الليف SI في نظامنا التلفزيوني يكون حاصل جداء عرض النطاق الكهربائي بالطول : $0.71\ (33)=23.4\ MHz\times km$. ويكون زمن الصعود المقابل هو : $0.35/23.4\times10^6=15\ ns/km$. وبتذكرنا ان ميزانية زمن الصعود لليف كانت 11.9 ns يكون طول الليف SI المسموح به : $11.9/15=0.793\ km=793\ m$. في هذه الحالة ومع ان ميزانية القدرة تسمح بـ 1.5 km تقريباً فان ميزانية زمن الصعود (أو ميزانية عرض النطاق تحد طول الوصلة إلى ما دون 800 m بقليل . وهذا النظام يكون محدداً بعرض النطاق وليس محدداً بالقدرة . إذا كان الطول المطلوب أقل من 800 m فان التصميم يفي بالغرض . ومن أجل إطالة المسار فانه يمكن ذلك بمجموعة من المعايرات . ان إنقاص مقاومة الحمل هي المعايرة الأسهل . ان هذا سينقص زمن صعود المستقبل وسيخصص مقدار أكبر من ميزانية زمن الصعود إلى الليف .

دعنا نبدل الآن الليف SI بالليف GRIN بينما نحتفظ بالمنبع الـ LED . ان حاصل جداء الطول بعرض النطاق الكهربائي 3 dB لليف هو $0.71\ (500\times10^6)=355\ MHz\times km$ وزمن صعوده هو $t_{mod}/L=0.35/355\times10^6=1\ ns/km$. ان هذه النتيجة تعني تشوه الأسلوب فقط . ويجب ان يحسب تشتيت المادة أيضاً . ان انبساط النبضة المشتت باستعمال الـ LED هو : $M\ \Delta\lambda=90\ (35)=3150\ ps/km\simeq3.2\ ns/km$ حيث كنا قد حصلنا على $M=90\ ps/(nm\times km)$ عند $0.85\ \mu m$ من الشكل (3 ـ 8) . ان تحويل انبساط النبضة إلى عرض النطاق (باستعمال المعادلة 3 ـ 19) وثم إلى زمن الصعود المكافىء (من المعادلة 7 ـ 2) يبين ان انبساط النبضة وزمن الصعود متساويان تقريباً . وهكذا يكون زمن الصعود العائد إلى تشتيت المادة .

$t_{dis}/L=3.2$ ns/km . ويحسب زمن الصعود الكلي لليف من المعادلة التالية :

$$t_F^2 = t_{dis}^2 + t_{mod}^2 \qquad (4\text{-}12)$$

والذي يعطي في هذه الحالة : $t_F/L=3.4$ ns/km . ويكون الطول المسموح به حينئذٍ هو : 11.9/3.4=3.5 km وهو أطول بكثير من 880 m الذي تسمح به ميزانية القدرة . يكون نظام GRIN في هذا المثال محدداً بالقدرة لأطوال أقل من 880 m . ان اقتراناً أكثر فعالية بين المنبع والليف سيحسن هذا النظام بدرجة كبيرة .

إن المثال المعالج في هذه الفقرة قد أوجز إجراء تصميم تماثلي عام وأوضح بعضاً من الخيارات للمكونات ولحلول الوسط الممكنة . تذكر ان النتائج الحاصلة كانت تقريبية لأن خواصاً مثل زمن الصعود وعرض النطاق وانبساط النبضة لا تميز المكونات تماماً . ان هذه المعلمات هي ببساطة مقاييس جيدة (وملائمة) لاستجابة العنصر . وعلى أي حال كنا متحفظين في حسابات ميزانية زمن الصعود والقدرة وهكذا ستنتج حلولنا نتائج عملية .

ان مواصفات النظام في هذه الفقرة كانت معتدلة إلى حد ما . واكتفينا بأجهزة بسيطة نسبياً . وسوف تتطلب وصلات أطول (عدة أقنية فيديوية مجمَّعة مرسلة لبضعة كيلومترات مثلاً) مكونات أكثر تطوراً . بينما تسمح الوصلات الأقصر التي تحمل معلومات أقل (توصيل هاتفي ذو قناة واحدة قصيرة مثلاً) باستخدام مكونات أرخص وأقل جودة .

(12 ـ 2) ـ تصميم نظام رقمي Digital System Design

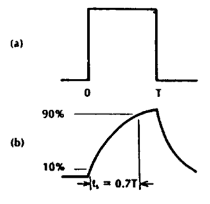
في المثال السابق عملنا من خلال مثال معين لكي نبين الاجراءات العامة المستخدمة في تصميم نظام تماثلي . وبالمثل سنبدأ في هذا الفصل بمجموعة من المواصفات لوصلة رقمية ونبين كيف يمكن مواجهة الاحتياجات . ان الطرق المستخدمة يمكن تطبيقها بشكل عام في تصميم نظم الألياف البصرية الرقمية .

مواصفات النظام System Specification

إن للنظام التماثلي الذي قدم في الفقرة (12 ـ 1) متطلبات معتدلة يحتاجها . سنعتبر الآن نظاماً رقمياً يجب ان يواجه معايير صعبة إلى حد ما . فالوصلة يجب ان ترسل سلسلة نبضات 40 Mbps NRZ على مسار طوله 100 km بمعدل خطأ مقداره 10^{-9} أو أفضل من ذلك . ويجب إنجاز هذا بدون مكررات . يظهر من البداية اننا نحتاج إلى ليف يكون جداء معدل الإرسال عليه بالطول كبيراً جداً (المعدل × الطول) وبتخميد صغير جداً . وكذلك سيكون ضرورياً باعث ضوء ومكشاف سريعين جداً ليناسبان معدل معطيات مقداره 400 Mbps . يجب ان نتنبأ أيضاً ان سويات الإشارة الواصلة للمستقبل ستكون صغيرة حيث سنحتاج في هذه الحالة إلى مستقبل حساس جداً . إن التحاليل التالية ستشير إلى أي مدى تكون هذه التنبؤات صحيحة . إن حساب ميزانيتي زمن الصعود والقدرة تشكل معظم عمليات التحليل .

ميزانية زمن الصعود Rise-time Budget

يبين الشكل (12 ـ 1) نبضة عيِّنة . فمن أجل ترميز NRZ يكون كل من مدة النبضة ودور تكرارها مساوٍ إلى T=1/R . ان تقديراً معقولاً لزمن صعود



شكل (12 ـ 1) ـ مطلب زمن صعود النظام . (a) نبضة دخل مثالية و (b) ـ استجابة نظام نبضة دنيا . .

النظام الكلي المطلوب t_s هو ألا يكون أكثر من 70٪ من مدة النبضة كما يبينه الشكل . أي انه يجب ان يحدد زمن الصعود بالعلاقة التالية :

$$t_s = 0.7\,T = 0.7/R_{NRZ} \qquad (5\text{-}12)$$

ويؤدي برهان مماثل من أجل إشارة العودة للصفر R_z ، حيث تكون مدة النبضة فيها مساوية لنصف دور التكرار T ، إلى ما يلي :

$$t_s = 0.7\,(T/2) = 0.35/R_{RZ} \qquad (6\text{-}12)$$

وهكذا من أجل إشارة 400 Mbps NRZ يكون زمن الصعود المسموح به هو : $t_s = 0.7/4\times10^8 = 1.75$ ns . ويجب ان يكون هذا الزمن موزعاً بين المنبع الضوئي والليف والمكشاف الضوئي (متضمناً مقاومة الحمل) بالطريقة المشار إليها بالمعادلة (12 ـ 2) . أي أن :

$$t_s^2 = t_{LS}^2 + t_F^2 + t_{PD}^2$$

قبل تحديد أثر زمن الصعود هذا (1.75 ns) على اختيار الليف يجب ان نطور أولاً العلاقة بين زمن صعود الليف وانبساط نبضته بافتراض سريان مفعول المعادلة (7 ـ 2) على ليفنا وباستعمال $f_{3\text{-}dB}$(كهربائي) $= 0.35/\Delta\tau$ من المعادلة (3 ـ 19) نستنتج ان زمن صعود الليف يخضع للعلاقة التالية :

$$t_F = \frac{0.35}{f_{3\text{-}dB}\ (\text{كهربائي})} = \Delta\tau \qquad (7\text{-}12)$$

إن زمن الصعود الكهربائي لليف ومدة انبساط النبضة الكلية عند منتصف القيمة العظمى متساويان . ومع ان هذه العلاقة غير دقيقة تماماً الا انها يمكن ان تفيد في حسابات التصميم الأولية .

نرى من هذه النتيجة الأخيرة انه يجب ان يكون انبساط النبضة لليف المختار أقل من 1.75 ns من أجل طول 100 km (انبساط لكل وحدة طول أقل من 1.75 ps/km) . وهذا لا يمكن تحقيقه بألياف SI أو GRIN متعددة الأسلوب حيث تكون الانبساطات النموذجية لنبضتها أقرب إلى 15 ns/km و 1 ns/km على

التالي (كما أشير إليه في الجدول ٥ ـ 2) . حتى ان الالياف وحيدة الاسلوب ذات انبساطات نبضة تبلغ تقريباً 500 ps/km عند أطوال موجة تشغيل قرب 0.8 μm . ان الخيار مقتصر الآن على ألياف وحيدة الأسلوب تعمل عند 1.3 μm أو 1.55 μm . ونظراً للطول المفرط لليف يجب ان تكون الخسارات لكل كيلومتر صغيرة إلى حد بعيد . حتى ان خسارة صغيرة تصل حتى 1 dB/km (تؤدي لخسارة إجمالية مقدارها 100 dB لوصلتنا ذات الطول 100 km) ستكون غير مقبولة . نبين في هذه الفقرة فيما بعد ان خسارة النظام الكلية متضمنة جميع القارنات والموصلات يجب ان تكون أقل من حوالي 37 dB . وهكذا سنستعمل ليفاً وحيد الأسلوب يعمل عند 1.55 μm وهي منطقة التخامد الأدنى . سنفترض خسارة مقدارها 0.25 dB/km يمكن تحقيقها عند 1.55 μm من أجل بقية هذا المثال .

ان انبساط النبضة لليف وحيد الأسلوب يعود إلى تشتيت المادة ودليل الموجة . نلاحظ من الشكلين (3 ـ 8) و (5 ـ 19) ان عاملي التشتيت للمادة ولدليل الموجة عند 1.55 μm هما على التتالي :

$$M' = 4.5 \text{ ps/(nm}\times\text{km)} \quad \text{و} \quad M = -20 \text{ ps/(nm}\times\text{km)}$$

وبسبب اختلاف إشارتي عاملي التشتيت فان أحدهما يلغي الآخر ويكون التشتيت الصافي مساوٍ إلى :

$$M_t = 20 - 4.5 = 15.5 \text{ ps/(nm}\times\text{km)}$$

نحتاج ثنائي ليزر In Ga As P وحيد الأسلوب يبث عند 1.55 μm لأن نمط اشعاعه يماثل إلى حد بعيد نمط الانتشار وحيد الأسلوب لليف . وبالإضافة لذلك فان عرض الخط ضيق بما فيه الكفاية لينقص حتى الحد الأدنى انبساط النبضة . ان ثنائي الليزر الذي سنستعمله ذو عرض طيف 0.15 nm وزمن صعود 1 n.s وهكذا يكون انبساط النبضة الكلي لليف هو :

$$\tau = L\, M_t\, \Delta\lambda = 100\,(15.5)\,(0.15) = 233 \text{ ps} = 0.23 \text{ ns}$$

وهذا هو في الواقع زمن صعود الليف وفقاً للمعادلة (12 ـ 7) . ولحسن الحظ فان : t_F=0.23 ns هو جزء صغير من ميزانية زمن الصعود البالغة 1.75 ns .

لاحظ ان ثنائي LED سوف لن يفي بالغرض وذلك لعدة أسباب .

أولاً : ان ثنائيات الـ LED الجيدة تبث في المدى من 1.3 μm إلى 1.55 μm ولها عروض طيف بحدود 50 nm . وسيكون انبساط النبضة لليف مساوٍ حينئذٍ إلى :

$$100\ (15.5)\ (50) = 77.5 \times 10^3\ \text{ps} = 77.5\ \text{ns}$$

وهذا كثير جداً من أجل النظام المقترح . وثانياً : ان ثنائيات الـ LED تشع ضمن زاوية عريضة تجعل الاقتران إلى ليف صغير وحيد الأسلوب ذي فتحة نفوذ عددية صغيرة غير فعال البتة . ومن أجل نظام طويل يجب ان نطلق في الليف ما أمكن من القدرة .

نستطيع الآن ان نحسب حصة زمن صعود المكشاف الضوئي من المعادلة (12 ـ 2) كما يلي :

$$t_{PD}^2 = t_S^2 - t_{LS}^2 - t_F^2 = 1.75^{-2} - 1 - 0.23^2 = 2$$

$$t_{PD} = 1.4\ \text{ns}$$

من المهم عند الترددات العالية ان تكون سعة الثنائي الضوئي صغيرة قدر الإمكان . ان هذا يسمح بمقاومة حمل أكبر تزيد حساسية المستقبل حيثما يكون الضجيج الحراري عاملاً مؤثراً . يجمع سطح المكشاف الضوئي الضوء الصادر من نهاية الليف وحيث ان الليف وحيد الأسلوب صغير فيكون السطح الفعال صغيراً وينقص حتى الحد الأدنى سعة المكشاف C_d . افترض اننا وجدنا مكشافاً ضوئياً ذا سعة C_d= 1 pF وزمن صعود محدداً بزمن العبور : t_{TR}=0.5 nsفيمكن كتابة زمن الصعود المحدد بشروط الدارة وفقاً للمعادلة (7 ـ 15) كما يلي : t_{RC}=2.19 R_L C_d . ويحسب زمن الصعود الكلي للثنائي الضوئي من المعادلة التالية :

$$t_{PD}^2 = t_{TR}^2 + t_{RC}^2 \qquad (8\text{-}12)$$

باستعمال $t_{TR}=0.5$ ns $t_{PD}=1.4$ ns نجد ان $t_{RC}=1.3$ ns . وتكون القيمة العظمى الناتجة لمقاومة الحمل حينئذٍ ما يلي :

$$R_L = \frac{t_{RC}}{2.16\ C_d} = \frac{1.6\times10^{-9}}{2.19\times10^{-12}} = 594\ \Omega$$

وإذا استعمل مكبر بمقدِّمة عالية الممانعة أو ذو ممانعة عابرة يمكن عندها زيادة مقاومة الحمل . يوجز الجدول (12 ـ 2) حسابات زمن الصعود .

لقد أكملنا الآن حسابات ميزانية زمن الصعود . وباستعمال LD ذي عرض خط ضيق يعمل عند 1.55 μm أمكن تصميم نظام يسهم الليف فيه بقدر قليل جداً في تحديد عرض النطاق . وسنبحث فيها يلي ميزانية القدرة .

جدول (12 ـ 2) ـ حسابات ميزانية زمن الصعود (ns)

ميزانية النظام				1 75
المنبع الضوئي t_{LS}		1 0		
الليف $t_F=\Delta\tau$		0.23		
المكشاف الضوئي				
زمن العبور t_{TR}	0 5			
الدارة $t_{RC}=2\ 19\ R_L\ C_d$	1 3			
الإجمالي $t_{PD}=(t_{TR}^2+t_{RC}^2)^{1/2}$		1.4		
زمن الصعود للنظام $(t_{LS}^2+t_F^2+t_{PD}^2)^{1/2}$			1.75	1.75

ميزانية القدرة Power Budget

سنفترض في هذه المرحلة عدة أمور بشأن المكونات والتقنيات المتاحة لاستعمالها في نظامنا . ان جميع الافتراضات المعمول بها معقولة مع انها تمثل في الواقع خواص عالية النوعية جداً وليس خواص نموذجية . وتتضمن افتراضاتنا ما يلي : قدرة خرج منبع 5 dBm (حوالي 3.2 mW) وخسارة اقتران المنبع بالليف 3 dB وموصلين خسارة كل منهما 1 dB و 50 وصلة دائمة خسارة كل منها 0.1 dB

موزعة على مسافات متوسط أطوالها 2 km على طول المسار البالغ طوله 100 km نحتاج إليها لنسهِّل عملية انشاء وتوضع الكابل الليفي . ومن الحكمة أيضاً ان نأخذ في الحسبان خسارات قد تحدث إذا ما انقطع الليف بدون توقع واحتاج ان يوصل توصيلاً دائماً .

يلخص الجدول (12 ـ 3) حسابات ميزانية القدرة . تصل الخسارة الكلية للنظام بما فيها التخامد في الليف 25 dB إلى 35 dB وحيث اننا ابتدأنا بسوية قدرة مقدارها 5 dBm فان هذا يترك مقدار $5-35=-30$ dBm كسوّية قدرة بصرية عند المستقبل . وكما سنرى لاحقاً في هذه الفقرة ان مستقبلاً يستعمل مكشافاً ضوئياً APD يتطلب حوالي 40 dBm− لتحقيق معدل خطأ مقداره 10^{-9} عند 400 Mbps . أن الإشارة المسلّمة تكون أعلى بمقدار 10 dB وان الاحتياط في القدرة للمستقبل APD هو القدرة المتوفرة مطروح منها حساسية المستقبل : $-30-(-40)=10$ dB . ونرغب على العموم باحتياط مقداره 6 dB نعتبره من أجل القدرة المنخفضة الناتجة عن تقادم ثنائي الليزر ومن أجل خسارات أخرى طارئة ليس من السهل تحديدها سلفاً . ويتضمن الجدول (12 ـ 3) أيضاً النتائج الحاصلة باستعمال مستقبل PINFET عالي الممانعة . ان هذا المستقبل أقل حساسية بمقدار 8 dB من الجهاز الجرفي فهو يقدم احتياطاً في القدرة مقداره 2 dB فقط .

إذا كانت حساسية المستقبل معطاة فان التصميم يكون مكتملاً الآن . وغالباً ما يتوجب على المصمم أن يحدد سويات القدرة المطلوبة . وسنبين كيف يمكن ان يتحقق هذا . ستسمح نتائج هذه المناقشة للمصمم ان يتخذ قراراً باختيار أما مستقبل بسيط منتهٍ بثنائي PIN وإما مستقبل أكثر تعقيداً ذي ممانعة عالية أو ذي ممانعة عابرة وإما مستقبل APD الأكثر تعقيداً من سابقيه . وإضافة لذلك سنحدد كيف تتغير حساسية المستقبل مع معدل المعطيات .

جدول (12 ـ 3) ـ حسابات ميزانية القدرة

قدرة خرج ثنائي ليزر		5 dBm
خسارة اقتران المنبع	3 dB	
خسارة الموصل (موصلان)	2 dB	
خسارة الوصلات الدائمة (50 وصلة)	5 dB	
تخامد الليف (100 km)	25 dB	
الخسارة الإجمالية	35 dB	
القدرة المتوفرة عند المستقبل (35 ـ 5)		−30 dBm
مستقبل APD		
الحساسية	−40 dBm	
هامش الخسارة (30 ـ 40)		10 dB
مستقبل PINFET هجيني عالي الممانعة		
الحساسية	−32 dB	
احتياط الخسارة (30 ـ 32)		2 dB

حساسية مستقبل محدود بضجيج الكَمْ

Quantum-Noise-Limited Receiver Sensitivity

يقدم مستقبل محدود بضجيج الكَمْ حدود الكشف القصوى وسنحسب حساسيته لكي نقدم علامة مرجعية يقارن بها ما تسفر عنه قياسات أجهزة الاستقبال الأخرى . وكما أشير إليه في الفقرة (11 ـ 3) فان معدل الخطأ من أجل نظام محدد بالكمْ وبتيار ظلام مهمل يعطى بالعلاقة : $P_e = \exp(-n_s)$ حيث n_s هو متوسط عدد الالكترونات الضوئية للإشارة لكل بتّة . وكما يبينه الجدول (11 ـ 2) ان العدد $n_s=20.7$ يقابل معدل خطأ مقداره 10^{-9} . وحيث انه لا معنى لأجزاء الالكترون فاننا سنأخذ $n_s=21$ لأجل نظامنا .

ان متوسط عدد الفوتونات الواردة لانتاج n_s الكتروناً هو n_s/η حيث η هي كفاءة الكمْ . ان القدرة البصرية عند الذروة في نبضة مستطيلة ترتبط بـ n_s كما

ورد في المثال السابق في الفقرة (11 ـ 3) بالعلاقة التالية :

$$P = \frac{h f n_s}{\eta \tau} = \frac{h c n_s}{\eta \lambda \tau} \quad (8\text{-}12)$$

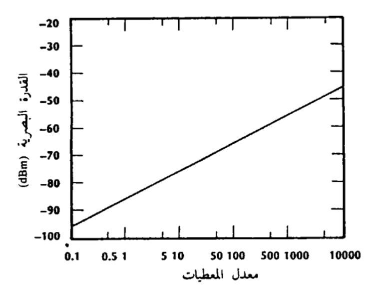
حيث τ هي مدة النبضة . من أجل إشارات NRZ تكون $\tau=1/R$ ومن أجل إشارات RZ تكون $\tau=1/2R$. وتعطى P من أجل نظام NRZ حينئذٍ بالعلاقة التالية :

$$P = \frac{h c n_s R}{\eta \lambda} \quad (10\text{-}12)$$

بينما تبلغ الذروة من أجل نبضات RZ ضعفي هذه القيمة . وبشكل أساسي يجب ان تتجاوز الطاقة في نبضة (وهي جداء قدرة الذروة في مدة النبضة لنبضة مستطيلة) السوية $hcn_s/\eta\lambda$ بغض النظر عن نظام الترميز .

ينتج استعمال $n_s=21$ و $\eta=1$ و $\lambda=1.55\ \mu m$ و $R=4000$ Mbps في المعادلة (12 ـ 10) حساسية مقدارها $P=1.08$ nW . وهذا يساوي 1.08×10^{-6} أو -59.7 dBm . وفي شروط مثالية محددة بالكمْ فيجب على النظام ان يسلّم قدرة بصرية مقدارها -59.7 dBm على الأقل إلى المكشاف الضوئي ليؤمن معدل خطأ (BER) مقداره 10^{-9} . بافتراض ان كفاءة الكمْ مقدارها 70٪ فان سوية القدرة المطلوبة ترتفع إلى -58.1 dBm . ان المستقبل APD الذي أشير إليه في الجدول (12 ـ 3) ذو حساسية مقدارها -40 dBm وهي أضعف بحوالي 20 dB من حد الكمْ المثالي. ان هذا يحدث عند العمل في المنطقة من $1.3\ \mu m$ إلى $1.6\ \mu m$ بسبب الضجيج الفائض الكبير للثنائيات الضوئية الجرفية In Ga As . ان الضجيج كبير لدرجة ان الأرباح المثلى تكون معتدلة بحدود 10 dB . يسمح الربح الصغير بالتغلب على الضجيج الحراري بمقدار صغير فقط . نحسب لاحقاً في هذه الفقرة الحساسية المحددة بالضجيج الحراري وسنرى ان الـ APD ضعيف الربح في هذا المثال يقدم تحسيناً بحدود 12 dB زيادة عن تلك الحالة .

يبين الشكل (12 ـ 2) رسماً بيانياً للمعادلة (12 ـ 10) بكفاءة كمْ مفترضة قيمتها 100٪ وبسويات قدرة محوَّلة إلى dBm . يترواح مدى الكفاءات عملياً بين 55٪ و 80٪ كما ذكر في الفقرة (7 ـ 4) .



شكل (12 ـ 2) ـ حساسية مستقبل محدد بضجيج الكمْ عند 1.55 µm من أجل 10^{-9} BER .

يمكن حساب الحساسية الحقيقية لمكشاف من المعادلة (12 ـ 10) مباشرة ويمكن إيجادها من المعادلة (12 ـ 2) أيضاً بتقسيم القدرة التي نحصل عليها من المنحنى على كفاءة الكمْ الفعلية . يذكر مصنعوا المكشاف في قوائمهم على الأغلب الاستجابية ρ أكثر من كفاءة الكمْ η . يرتبط الاثنان بالمعادلة (7 ـ 7) التي تنتج بضمها للمعادلة (12 ـ 10) ما يلي :

$$P = \frac{e\, n_s\, R}{\rho} \qquad (11\text{-}12)$$

ان هذا الشكل من الحساسية المحددة بالكمْ ذو استعمال أسهل من المعادلة (12 ـ 10) إذا كانت استجابية المكشاف معروفة .

بافتراض كفاءات كمْ متساويةٍ عند جميع أطوال الموجة فأن المعادلة (12 ـ 10) تتنبأ بتحسن الحساسية بتزايد طول الموجة العاملة . ان نسبة طول

الموجة الأطول ذات الأهمية الكبرى ($1.55 \mu m$) إلى طول الموجة الأقصر ($0.8 \mu m$) تساوي 2 تقريباً . وهكذا فإن أطوال الموجة الأقصر تتطلب تقريباً ضعفي القدرة التي تتطلبها أطوال الموجة الأطول . وذلك يمثل ميزة مقدارها 3 dB تقريباً للأنظمة ذات أطوال الموجة الطويلة .

هناك نقطة أخرى تتعلق بحسابات الحساسية تستحق الذكر . ان الرمز P في المعادلتين (12 ـ 10) و(12 ـ 11) وفي الشكل (12 ـ 2) يمثل القدرة البصرية عند الذروة . وهي قدرة الذروة المستلمة عند استقبال (1) . وحيث ان الرسائل النموذجية تحتوي أعداداً متساوية من (0) ومن (1) فان متوسط القدرة في سلسلة نبضات NRZ هو نصف قيمة الذروة فقط وعندها تكون :

$$P_{AVE} = \frac{h\, c\, n_s\, R}{2\, \lambda\, \eta} \qquad (12\text{-}12)$$

وان رسماً بيانياً لحساسية القدرة سيكون في المتوسط أقل بـ 3 dB من المنحنى المرسوم في الشكل (12 ـ 2) .

حساسية مستقبل محدود بالضجيج الحراري

Thermal-Noise-Limited Receiver Sensitivity

ان الـ SNR المحددة بالضجيج الحراري المعطاة في المعادلة (11 ـ 11) يمكن إعادة كتابتها بدلالة استجابية المكشاف . إضافة لذلك فإذا كنا نعبر عن ضجيج المكبر باستعمال درجة حرارة ضجيج النظام المكافىء تكون النتيجة كما يلي :

$$\frac{S}{N} = \frac{R_L\, (\rho\, P)^2}{4k\, T_e\, \Delta f} \qquad (13\text{-}12)$$

وتحدد الـ SNR المحددة حرارياً المقابلة لمعدل خطأ معطي من المعادلة (11 ـ 29) أو من الرسم البياني لتلك المعادلة في الشكل (11 ـ 11) . نجد من تلك المعطيات ان BER قدرها 10^{-9} يتطلب SNR قدرها 21.5 dB (أي أن

(S/N=142) . وبحل المعادلة (11 ـ 13) من أجل القدرة المطلوبة ينتج :

$$P = \frac{\sqrt{[4k\ FT\ (\Delta f/R_L)\ (S/N)}}{\rho} \qquad (14\text{-}11)$$

في مقدمة هذه الفقرة اخترنا $R_L=594\ \Omega$ اعتماداً على قيود زمن الصعود . وكانت تلك هي القيمة العظمى المسموح بها عند استعمال مقدَّمة المستقبل البسيط المنتهية بثنائي ضوئي . سنأخذ عرض نطاق المستقبل Δf مساوٍ إلى مقلوب مدة النبضة . من أجل سلسلة نبضات NRZ فان $\Delta f=1/T=R$. أي انه بجعل عرض نطاق الضجيج مساوٍ إلى معدل المعطيات من أجل أنظمة NRZ وبافتراض أن $T=300°K$ ورقم ضجيج يساوي 2 واستجابية تساوي 1 A/W ينتج لدينا أن :

$$P = \sqrt{\left[\frac{4\ (1.38\times10^{-23})\ (2)\ (300)\ (4\times10^{8})\ (142)}{594}\right]} = 1.78\ \mu W$$

أي -27.5 dBm . تذكر ان الحساسية المثالية المحددة بالكمْ كانت -59.7 dBm في هذا المثال أي أفضل بـ 32 dB من النتيجة المحددة حرارياً . وكما أشير إليه في الجدول (12 ـ 3) تكون سوية القدرة عند المستقبل -30 dBm فقط أي أقل بـ 2.5 dB من تلك المطلوبة للمستقبل المحدد حرارياً . ان مستقبلاً بثنائي PIN منتهٍ بمقاومة سوف لن يعمل في هذا النظام .

لدينا عدة خيارات حتى هذه المرحلة من أجل تحسين الحساسية . نستطيع ان نستعمل مقدَّمات عالية الممانعة أو ذات ممانعة عابرة والتي تعمل عند سويات أقل من المقدّمات المنتهية بثنائي . ويجب ان تتضمن هذه المستقبلات مسوّيات . من أجل العمل عند 400 Mbps فقد تم بناء مستقبلات In Ga As PINFET هجينة عالية الممانعة وبممانعة عابرة ذات حساسيات حوالي -32 dBm . ان هذا أفضل بمقدار 4 dB مما للدارة المنتهية بمقاومة ويقدم 2 dB احتياطاً من أجل نظامنا .

ان الثنائيات الضوئية الجرفية In Ga As اكثر حساسية من المستقبلات PINFET عالية الممانعة بحوالي من 5 dB إلى 8 dB في منطقة الموجة الطويلة . وبافتراض تحسين مقداره 8 dB ينتج ذلك حساسية 40 dBm– ويقدم هامش قدرة بمقدار 10 dB . يلخص الجدول (12 ـ 3) نتائج ميزانية القدرة .

حساسيات مستقبل معمّمة Generalized Receiver Sensitivities

نستطيع ان نطور بعض النتائج العامة من التحاليل السابقة والتي يمكن تطبيقها على مدى من معدلات المعطيات . سنقصر مناقشتنا أولاً على سلاسل نبضات NRZ . وسنجعل عرض نطاق المستقبل Δf مساوٍ إلى معدل المعطيات R لأجل هذه الحالة كما ورد سابقاً . ومن أجل ان نجعل النتائج أكثر فائدة سنقوم بتقييسها بحيث أنها يمكن ان تستعمل بقيم عشوائية من الاستجابية ورقم الضجيج . وبالإضافة إلى هذا التقييس سنفترض ان زمن الصعود المرافق لمقاومة الحمل ولسعة الثنائي الضوئي يستنفذ ميزانية زمن الصعود كلياً . سيعطينا هذا الافتراض أفضل حساسية يمكن الحصول عليها بمستقبل بسيط بمقدَّمة منتهية . وبتوحيد المعادلتين (12 ـ 5) و(7 ـ 15) ينتج ما يلي :

$$t_{RC} = \frac{0.7}{R} = 2.19\ R_L\ C$$

ومنه :

$$R_L = \frac{1}{\pi\ R\ C_d} \qquad (15\text{-}12)$$

وتصبح المعادلة (12 ـ 14) الآن كما يلي :

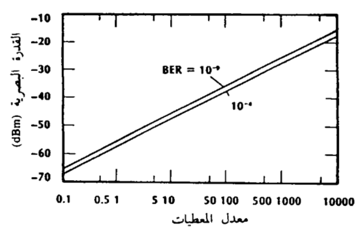
$$\frac{\rho\ P}{F^{1/2}} = R\ \sqrt{[4k\ T\ \pi\ C_d\ (S/N)]} \qquad (16\text{-}12)$$

ان تقويم الجانب الأيمن من هذه المعادلة من أجل : T=300°K و C_d=1 PF و S/N=142 (بما يناسب معدل خطأ قدره 10^{-9}) يعطي :

$R\ 10^{-15}\times\overline{2.72}=|\rho PF^{1/2}$. و R مقدرة بالـ Mbps و P بالـ nW فتبسط المعادلة إلى :

$$\frac{\rho P}{F^{1/2}} = 2.72\ R \qquad (17\text{-}12)$$

ويبين الشكل (12 ـ 3) رسماً بيانياً لهذه النتيجة . إذا كانت $\rho=1$ A/W و $F=1$ يمكن قراءة الحساسية مباشرة بالـ dBm . وإلا يجب تحويل المقياس الشاقولي إلى ميللي وات مضروباً بالجذر التربيعي لرقم الضجيج ومقسوماً على الاستجابية . وكما ذكر في الفقرة (7 ـ 4) فان الاستجابية تكون قريبة من 0.5 للسيليكون في المنطقة من 0.8 μm إلى 0.9 μm ومن 0.7 للجرمانيوم في المنطقة من 1.0 μm إلى 1.8 μm ومن 0.7 إلى 1.1 لـ In Ga As في المنطقة من 1.0 μm إلى 1.7 μm .



شكل (12 ـ 3) ـ حساسية مستقبل محدد بالضجيج الحراري .

إذا كان معدل الخطأ هو 10^{-4} فقط فان الشكل (11 ـ 11) يشير إلى انه يجب ان يكون الـ SNR مساوٍ إلى 17.5 dB أو أفضل . وعندئذٍ تكون $S/N=56$ في المعادلة (12 ـ 16) ويبقى :

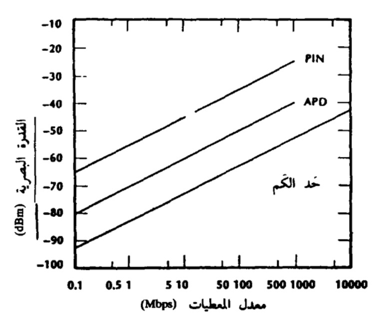
$$\frac{\rho P}{F^{1/2}} = 1.71\ R \qquad (18\text{-}12)$$

حيث لا زال لدينا $C_d=1$ pF و T=300°K و R بـ Mbps و P بالـ nW .
وتظهر هذه النتيجة في الشكل (12 ـ 3) أيضاً . وكما يلاحظ من الشكل تختلف سويات القدرة المطلوبة من أجل معدلي خطأ 10^{-4} و 10^{-9} بمقدار 2 dB فقط . ومرة أخرى نرى ان حساسية معدل الخطأ لسوية القدرة البصرية ذات شأن .

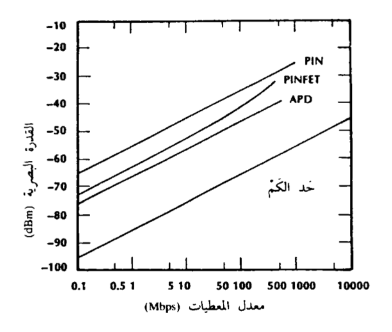
تعتمد المنحنيات في الشكل (12 ـ 3) على طول الموجة العاملة فقط من خلال اعتمادية الاستجابية على طول الموجة . يتطلب ثنائي ضوئي In Ga As يعمل عند 1.55 μm وذو ρ=1 فقط نصف القدرة التي يتطلبها ثنائي ضوئي سيلكيوني يعمل عند 0.8 μm وذو ρ=0.5 . ان مكشاف طول الموجة الطويلة هو أكثر حساسية بمقدار 3 dB في هذه المقارنة .

يقارن الشكلان (12 ـ 4) و (12 ـ 5) حساسيات مستقبلات مختلفة . ويطبق الشكل (12 ـ 4) في المنطقة من 0.8 μm إلى 0.9 μm ويطبق الشكل (12 ـ 5) في المنطقة من 1.3 μm إلى 1.6 μm .

في النافذة الأولى ذات طول الموجة القصيرة تقارب المستقبلات المثلى التي تستعمل APD حد الكمْ وضمن حوالي 10 dB إلى 13 dB . يمنع الضجيج



شكل (12 ـ 4) ـ حساسيات مستقبل . $BER=10^{-9}$ و λ=0.82 μm . الثنائيات الضوئية هي عناصر سيليكونية .



شكل (12 ـ 5) ـ حساسيات مستقبل . $BER=10^{-9}$ و $\lambda=1.55\ \mu m$. الثنائيات الضوئية هي عناصر In Ga As . يتضمن المستقبل PINFET مكبراً متقدماً عالي المانعة (أو ذا ممانعة عابرة) .

الفائض وتيار الظلام المستقبلات APD من أن تحقق بالفعل الحساسية المثالية المحددة بضجيج الكمْ . وكما لوحظ من الشكل (12 ـ 4) تتطلب المستقبلات بثنائي PIN المنتهية بمقاومة والمحددة بالضجيج الحراري قدرة بحدود 25 dB إلى 30 dB أكثر مما يتطلبه مستقبل الكمْ المثالي . وكمقارنة أخيرة يمثل المستقبل APD تحسيناً يزيد بحوالي 15 dB عن المستقبل PIN وهذه هي ميزة أساسية . مثلاً إذا كان تخامد الليف 3 dB/km فانه يمكن ان تكون وصلة APD أطول بمقدار 5 km من وصلة تستعمل الثنائي PIN .

وعند أطوال الموجة الأطول تتطلب مستقبلات الـ In GaAs APD قدرة أكثر بحوالي 20 dB من المستقبلات المثالية . ان المستقبلات ذات الثنائي PIN المنتهية بمقاومة هي أضعف بمقدار من 10 dB إلى 12 dB أخرى . ان مقدّمات PINFET عالية الممانعة (وذات الممانعة العابرة) وبحساسيات تقع بين تلك الخاصة بمستقبلات الـ APD وبالمستقبلات المنتهية بثنائيات ضوئية PIN هي

جذابة من أجل وصلات الإرسال الطويلة . يتألف مستقبل PINFET هجيني من ثنائي ضوئي In Ga As يتبعه مكبر متقدم Ga As MESFET . تبدأ حساسيته المرسومة بيانياً في الشكل (12 ـ 5) بالتدني عند معدل معطيات أعلى من 100 Mbps وذلك بسبب الاستجابة الترددية المحددة للمكبر المتقدم MESFET .

عند استعمال الشكلين (12 ـ 4) و(12 ـ 5) تذكر الافتراضات التي عرضت سابقاً . يجب إجراء تصحيحات تأخذ في الحسبان رقم ضجيج المكبر المتقدم واستجابية المكشاف الضوئي وسعته . نأمل ان يكون هذان الشكلان قد قدما بتفصيل كافٍ تمكنك من إنشاء منحنيات مشابهة من أجل حالات معينة . ومع ذلك فان المعْلَمات التي يطبق من أجلها الشكلان (12 ـ 4) و(12 ـ 5) قد اختيرت لتكون ممثلة لتجهيزات عملية . يمكن ان يستعمل هذان الشكلان مباشرة كمرشدين من أجل بحث أولي لنظام ما .

ان الأشكال الأربعة الأخيرة المنشأة بشكل خاص من أجل سلاسل نبضية NRZ تعطي بسهولة الحساسيات من أجل أنظمة RZ. ان نبضات RZ تتطلب من القدرة عند الذروة ضعفي ما تتطلبه نبضات NRZ من أجل معدل المعطيات ذاتها لأن مدة نبضات RZ نصف مدة نبضات NRZ . يطبق هذا التعبير سواء أكان الضجيج الحراري أو ضجيج الطلقات هو الذي يحد المستقبل . وهكذا ومن أجل سلاسل نبضية RZ ضاعِف وبكل بساطة القدرة الحاصلة من الشكلين (12 ـ 2) وحتى (12 ـ 5) . أي أضف 3 dB إلى سويات القدرة الموجودة في الأشكال .

مثال :

احسب الحساسية المحددة بضجيج الكَمْ والحساسية المحددة بالضجيج الحراري من أجل نظام 100 Mbps RZ بمعدل خطأ 10^{-9} . يعمل النظام عند 0.82 μm .

الحل :

نجد من الشكل (12 ـ 4) سويتي قدرة NRZ مطلوبتين بقيمة ‎−63 dBm‎ و ‎−36 dBm‎ من أجل الحدين الكَمْ والحراري على التتالي . وبإضافة 3 dB ينتج ‎−60 dBm‎ و ‎−33 dBm‎ كسويتي قدرة الذروة RZ المقابلتين .

لقد كنا نتعامل غالباً حتى الآن مع القدرات عند الذروة . وعندما نأخذ المعطيات على أنظمة حقيقية يكون قياس متوسط القدرة في سلسلة نبضات أسهل من قياس القدرة عند الذروة . ونستطيع بسهولة ان نستنتج العلاقة بين متوسط القدرة والقدرة عند الذروة باعتبار تسلسل من أصفار (0) وواحدات (1) متناوبة . ان هذه الخطة حقيقية لأن الرسائل النموذجية تحتوي أعداداً متساوية من (0) ومن (1) . وكما يبينه الشكل (12 ـ 6) ان قدرة NRZ المتوسطة هي نصف القدرة عند الذروة . تكون القدرة في هذا النظام بحالة وصل (ON) في نصف الوقت وتكون بحالة قطع (OFF) في نصفه الآخر . وعلى أي حال من أجل سلاسل نبضية RZ (المرسومة في الشكل) تكون القدرة في تسلسل من (1) ومن (0) بحالة وصل خلال ربع الزمن فقط وتكون بحالة قطع خلال ثلاثة أرباع الزمن . وهكذا تكون القدرة المتوسطة ربع القدرة عند الذروة . يبين الشكل ان سويات القدرة عند الذروة تختلف بعامل مقداره 2 وهذا ضروري من أجل معدلات خطأ متساوية . لقد ذكرنا هذا المطلب في وقت



شكل (12 ـ 6) ـ مقارنة سويتي القدرة المتوسطة والقدرة عند الذروة لتسلسل من الأصفار (0) والواحدات (1) المتناوبة . ومن أجل كل من ترميزي NRZ و RZ تكون الطاقة في كل نبضة هي ذاتها ($P_p T$) وتكون القدرة المتوسطة هي ذاتها ($P_{AVE}=P_p/2$) .

سابق في هذه الفقرة بعد المعادلة (12 ـ 10) مباشرة . ونستنتج كما أشير إليه في الشكل ان القدرات المتوسطة تكون متساوية من أجل نظامي الترميز .

مثال :

احسب سويات القدرة المتوسطة للمثال السابق .

الحل :

ان الحدين الكمْ والحراري هما 63 dBm- و 36 dBm- على التتالي من أجل النظام NRZ . تكون القدرة المتوسطة (التي تساوي نصف القيمة العظمى) أقل بمقدار 3 dB أي 66 dBm- و 39 dBm- . نستطيع ان نصل إلى نفس النتيجة مبتدئين بالحساسيتين RZ 60 dBm- و 33 dBm- المحددتين في المثال السابق . وحيث ان القدرة المتوسطة تساوي ربع القيمة العظمى فانها تكون أقل بمقدار 6 dB أي 66 dBm- و 39 dBm

(12 ـ 3) ـ الخلاصة

يدرك المهندسون المتمرسون انه قد توجد ثغرة بين التصميم النظري وتنفيذه الفيزيائي . يحدث هذا عندما تقارب النماذج التحليلية فقط السلوك الفعلي للنظام ومكوناته . ومع ذلك تفيد التحاليل النظرية المكثفة بالوصول في النهاية إلى النتيجة المرغوبة باقتصادية وبسرعة أكبر مما تؤديه الطرق التجريبية فقط وحتى ان تطويرات تقريبية تبين بوضوح توجهات تقترح التغيرات التصميمية المناسبة . مثلاً : لقد وجدنا كم هي حساسية معدل خطأ البتّة للتغيرات الصغيرة في سوية القدرة . تنبئنا هذه المعلومات عن القدرة المضافة المطلوبة لتحقيق مقدار BER مرغوب إذا كان الـ BER الحالي معروفاً . ان خطة تصميم جيدة هي في إكمال التحاليل النظرية بقدر ما هو عملي قبل مباشرة الانشاء أو شراء مكونات النظام .

يكون التصميم في معظم الحالات عملية تكرارية . وتؤخذ غالباً عدة طرق مختلفة فتقارن وتحفظ أو تهمل . وتبنى وتجرب فيها بعد نماذج عمل . وتبين الاختبارات أية فروق بين التنبؤات النظرية والنتائج التي حصلت فعلاً . وإذا كان التصميم الأصلي متحفظاً فان النظام يمكن ان يعمل بشكل مرض . وإذا لم تتحقق المواصفات فانه يمكن إجراء تحسينات وتصحيحات الآن باستعمال النظرية كمرشد . وعادة يعتمد التصميم النهائي على مجموع العمل النظري والتجريبي .

ينتج العديد من المصنعين مذكرات ملحوظات تطبيقية مكثفة يوزعونها مجاناً . ويمكن ان تكون هذه المذكرات مفيدة جداً لانها تكتب عادة ببساطة وبوضوح وانها تكون مؤسسة على التجهيزات المبنية فعلاً والمباعة من قبل المصنع . ان مصنّعي المكونات والتجهيزات الفرعية يرعبون في تقديم المساعدة وهم قادرون عليها .

يمكن استشارة عدد كبير من المؤلفات لزيادة فهمك لبصريات الليف . وان تفاصيلاً عن مواضيع معينة وردت في هذا الكتاب يمكن ايجادها في المراجع الواردة في نهاية كل فصل . توجّه قائمة الكتب انتباهك إلى الكتب المفيدة التي تمتد من المجال التمهيدي إلى المجال المتطور . يغطي بعضها المواد العملية والآخر يغطي المواضيع الأكثر نظرية .

كي تبقى جنباً إلى جنب مع المواضيع الجارية عليك ان تقرأ بانتظام واحداً أو أكثر من الدوريات الواردة في قائمة الكتب .

مسائل الفصل الثاني عشر

في مسائل هذا الفصل يطلب منك تصميم أنظمة بصرية ليفية خاصة . وهذه مسائل عامة وليس هناك من حل وحيد لكل منها بل هي قضايا تقابل حالات واقعية . أوجد حلاً يعتمد على مكونات ذات خواص معقولة (كما هو مقترح في هذا الكتاب أو كما هو محدد من مصادر موثوقة أخرى) . وعلى أية حال ، ضع فرضيات معقولة واذكرها بوضوح . وكما تشير إليه الأمثلة المعطاة في هذا الفصل ، يشمل التصميم اختيار المكونات (المنبع والمكشاف والليف والقوارن والموصلات . . . الخ) وتوصيف خواص التشغيل لها ووضع ميزانية القدرة وميزانية عرض النطاق وتقويم أداء النظام . ويتضمن التصميم اختيار طبوغرافيا الشبكة أيضاً (استعمال المكرِّرات إذا كان ذلك ضرورياً) وشكل التعديل .

صمِّم نظاماً يفي المتطلبات المذكورة في كل من المسائل التالية :

12 ـ 1 ـ ارسل إشارة ڤيديوية ذات عرض نطاق 4.5 MHz في مسار طوله 10 km . يجب ان تكون الـ SNR في المستقبل 48 dB أو أكثر . استعمل تعديلاً تماثلياً .

12 ـ 2 ـ كرِّر المسألة (12 ـ 1) مستعملاً تعديلاً رقمياً بمعدل خطأ 10^{-9} أو أفضل .

12 ـ 3 ـ ارسل إشارة NRZ بمعدل 2 Gbps في مسار طوله 100 km بدون استعمال مكررت بمعدل خطأ 10^{-9} أو أفضل .

12 ـ 4 ـ افترض ان النظام في المسألة (12 ـ 3) قد بني إلا انه سمح لمعدل الخطأ أن يتدنى إلى 10^{-4} . فإلى أي مسافة أبعد من 100 km يمكن ان ترسل الإشارة اعتماداً على اعتبارات القدرة فقط ؟ اعمل التغيرات الضرورية للنظام لتسمح بالإرسال في هذا المسار الأطول .

12 ـ 5 ـ ارسل إشارة صوتية ذات عرض نطاق 4 kHz لمسافة 100 m إذا كان الـ SNR يساوي 30 dB .

12 ـ 6 ـ كرِّر المسألة (12 ـ 5) مستعملاً تعديلاً رقمياً وبمعدل خطأ 10^{-5} أو أفضل .

12 ـ 7 ـ أَرسِلْ إشارة بترميز مانشستر بمعدل 2 Gbps في مسار طوله 100 km بدون استعمال مكرِّرات وبمعدل خطأ 10^{-9} أو أفضل .

12 ـ 8 ـ أَرسِلْ بمعدل 10 Mbps خلال نظام ذي خمسة مطاريف موضوعة على طول مسار مستقيم ويبعد كل منها عن الآخر مسافة 200 m وبمعدل خطأ أفضل من 10^{-9} .

12 ـ 9 ـ أَرسِلْ بمعدل 250 Mbps خلال نظام ذي 25 مطرافاً موزعاً بانتظام على محيط دائرة قطرها 1 km وبمعدل خطأ 10^{-9} أو أفضل .

12 ـ 10 ـ أَرسِلْ خلال ثلاث أقنية بآن واحد : الأولى للصوت والثانية للڤيديو والثالثة للمعطيات . طول المسار 10 km وعرض نطاق الصوت 4 kHz وعرض نطاق الڤيديو 4.5 MHz ومعدل المعطيات 10 Mbps (NRZ) . الـ SNR

للقناة الصوتية 25 dB وللقناة الڤيديوية 40 dB . معدل الخطأ لقناة المعلومات 10^{-9} أو أفضل .

12 ـ 11 ـ أَرسِلْ بمعدل 2 Gbps (RZ) خلال مسار طوله 5000 km وبمعدل خطأ 10^{-9} أو أفضل .

12 ـ 12 ـ أَرسِلْ ثلاث أقنية على نفس الليف بنفس الوقت . الأقنية ذات حوامل بصرية بقرب 1550 nm وتتباعد الواحدة عن الأخرى 2 GHz . معدل المعطيات هو 100 Mbps (NRZ) وطول المسار 100 km ومعدل خطأ المعطيات يجب أن يكون أفضل من 10^{-9} .

المراجع

الفصل الثاني عشر

1. Manufacturer's literature. Burlington, Mass.: Lasertron.
2. S. R. Forrest. "Photodiodes for Long Wavelength Communication Systems." *Laser Focus* 18. no. 12 (December 1982): 81-90.
3. Tien Pei Lee and Tingye Li. "Photodetectors." In *Optical Fiber Telecommunications*, edited by Stewart E. Miller and Alan G. Chynoweth. New York: Academic Press, Inc., 1979. pp. 622-23.
4. Forrest. "Photodiodes for Long Wavelength Communication Systems." pp. 84-85.
5. Michael Ettenberg and Gregory H. Olsen. "Diode Lasers for the 1.2 to 1.7 Micrometer Region." *Laser Focus* 18, no. 3 (March 1982): 61-66.
6. Manufacturer's literature, Burlington, Mass.: Lasertron.

أجوبة المسائل

الفصل الأول

1 ـ 1 ـ $dB = 10 \log (P_2/P_1)$

1 ـ 2 ـ $P = 0.001 \times 10^{dB/10}$

1 ـ 3 ـ 0.16 mW

1 ـ 4 ـ 1 mW

1 ـ 5 ـ 3920 lb.

1 ـ 6 ـ (ليف) 8 km و (محوري) 1.8 km

1 ـ 7 ـ 698

1 ـ 8 ـ نبضتان أو ثلاث نبضات بالثانية .

1 ـ 9 ـ 4.5 من الكابلات النحاسية ستساوي سعة الـ 672 قناة لكل كابل ليفي و 27 كابلاً نحاسياً يقدمون نفس سعة كابل ليفي DS-4 واحد .

1 ـ 10 ـ 30 .

1 ـ 11 ـ استعمل طول موجة : $\lambda = c/f$.

1 ـ 12 ـ 4.28×10^{14} Hz و 7.5×10^{14} Hz وعرض نطاق 3.2×10^{14} Hz .

1 ـ 13 ـ 3.3×10^{-19} J . تملك الفوتونات المرئية طاقة أكبر مما تملكه فوتونات تحت الحمراء .

1 ـ 14 ـ $P = 2.48\times10^{-9}$ W و $I = 1.6$ nA .

1 ـ 15 ـ 6.54×10^9 photons/s .

1 ـ 16 ـ 0.1 kbps و 10 kbps و 1 Mbps و 100 Mbps و 3×10^{12} bps .

1 ـ 17 ـ ليس لتذبذبات الحامل الوقت الكافي لكي تنمو .

1 ـ 18 ـ 7×10^8 قناة .

1 ـ 19 ـ أ ـ مراقبة إطلاق الصواريخ . ب ـ توزيع ڤيديوي حي لمحاضرة الصف إلى الغرف الأخرى في نفس البناء .

1 ـ 20 ـ لأجل 10 بليون منزل يبلغ عرض النطاق المطلوب 4×10^{13} Hz . يمكن لحامل بصري بتردد 3×10^{14} Hz ان يحمل هذه الإشارة .

1 ـ 21 ـ $R = 6.4\times10^{14}$ bps . لا يمكن لحامل بصري أن يتحول بين وصل (on) وقطع (off) بسرعة كافية .

الفصل الثاني

2 ـ 1 ـ $\alpha_i = 8°$.

2 ـ 2 ـ $NA = \sin\alpha$ حيث α هي زاوية القبول .

2 ـ 5 ـ $d = 3.9\ \mu m$.

2 ـ 6 ـ $w_0 = 5.09\ \mu m$.

2 ـ 7 ـ $I/I_0 = e^{-2r^2}$.

2 ـ 8 ـ التباعد : 5.09×10^{-4} rad. و $w_0 = 96.5$ km (على القمر) و $w_0 = 0.255$ m (على بعد 1 km) و $w_0 = 2.55$ m (على بعد 10 km) .

الفصل الثالث

3 ـ 1 ـ من أجل موجات أقصر من 1.3 μm ستصل الموجة الأطول إلى المستقبل أولاً . ومن أجل موجات أطول من 1.3 μm ستصل الموجة الأقصر إلى المستقبل أولاً .

3 ـ 2 ـ 2.7 ns/km و 0.18 ns/km .

3 ـ 3 ـ 0.6 ns/km و 0.04 ns/km .

3 ـ 4 ـ نتائج عيّنات (0.85 μm وعرض طيفي 30 nm وطول مسار 1 km) : عرض النطاق البصري يساوي 185 MHz وعرض النطاق الكهربائي يساوي 130 MHz ومعدل المعطيات (RZ) يساوي 130 Mbps ومعدل المعطيات (NRZ) يساوي 260 Mbps .

3 ـ 5 ـ (هــواء) $k = 7.77\times10^6$ rad/m و (زجــاج) $k = 1.149\times10^7$ rad/m .

3 ـ 6 ـ 0.12٪ و 2.4٪ و 4.39×10^{11} Hz و 8.78×10^{12} Hz .

3 ـ 7 ـ R = 0.319 وخسارة 1.67 dB .

3 ـ 12 ـ القدرة البصرية الإجمالية هي :

$$P = 4+2 \cos (d/2) \cos (\omega_m t + \phi_1 + d/2)$$

حيث تكون : $d = \phi_2 - \phi_1$.

الفصل الرابع

4 ـ 1 ـ $d = 0.847\ \mu m$ و $n_{eff} = 3.586$.

4 ـ 3 ـ $d = 1.689\ \mu m$.

4 ـ 4 ـ عدد الأساليب : 120, 12, 6 .

4 ـ 5 ـ TE_0 (d=0) و TE_1 (d=1.69 μm) و TE_2 (d=3.38 μm) و TE_3 (d=5.06 μm) .

4 ـ 6 ـ $1.69\ \mu m < d < 2.68\ \mu m$.

4 ـ 9 ـ $\Theta > 80.6°$ و $\Theta < 42.5°$.

الفصل الخامس

5 ـ 1 ـ $V = 7.85\ cm^3$ و $D = 20.04$ cm .

5 ـ 2 ـ $D = 23.2$ cm .

5 ـ 3 ـ 2321 انعكاس لكل متر .

5 ـ 7 ـ يعود الشعاع قبل $r/a = 0.7$ بالضبط .

5 ـ 8 ـ $\Theta = 8.11°$.

5 ـ 9 ـ $R = 1$ cm .

5 ـ 10 ـ 3286 أسلوباً و 1531 أسلوباً .

5 ـ 13 ـ $a/\lambda = 2.4 / [n_1 (n_1 - n_2)]^{1/2}$

وعدد الأساليب : $N = 132$ و $N = 121$.

5 ـ 14 ـ $a/\lambda = (p+q+1) / \{3.14 [2 n_1 (n_1 - n_2)]^{1/2}\}$

5 ـ 15 ـ

أ ـ وحيد الأسلوب ($f \times L = 0.227$ GHz×km)

ومتعدد الأساليب ($f \times L = 0.222$ GHz×km)

ب ـ وحيد الأسلوب ($f \times L = 4.55$ GHz×km)

ومتعدد الأساليب ($f \times L = 1.08$ GHz×km)

ت ـ وحيد الأسلوب ($f \times L = 0.667$ GHz×km)

ومتعدد الأساليب ($f \times L = 0.574$GHz×km)

ث ـ وحيد الأسلوب ($f \times L = 33.3$ GHz×km)

ومتعدد الأساليب ($f \times L = 1.11$ GHz×km) .

5 ـ 16 ـ $a = 4.43\ \mu m$ وعدد الأساليب : $N = 14, 12, 8$.

الفصل السادس

6 ـ 1 ـ $v(t) = 1 - \exp(-t/RC)$ وزمن الصعود 2.19 RC .

6 ـ 2 ـ V (مقدار) $= 1/[1+(RC)^2)]^{1/2}$.

6 ـ 5 ـ

ب ـ I (القمة) $= 500$ mA و $I_{d.c.} = 400$ mA و $P_{ave} = 8$ mW و

$m = 0.25$.

ت ـ I (القمة) = 500 mA و I_{dc} = 250 mA و P_{ave} = 5 mW و
. m = 1

ث ـ لاحظ قص الإشارة .

6 ـ 6 ـ 1٪ .

6 ـ 7 ـ زمن حياة الحامل 1.6 ns .

6 ـ 8 ـ طاقة ثغرة النطاق 2.24×10^{-19} J .

الفصل السابع

7 ـ 1 ـ i = 25 nA .

7 ـ 2 ـ t_r = 700 ps .

7 ـ 3 ـ طول موجة القطع 0.99 µm و $f = 3\times10^{14}$ Hz .

7 ـ 4 ـ طول الموجة :

$$\lambda = \frac{1.98 \times 10^{-25}}{\text{تابع العمل}}$$

7 ـ 5 ـ الاستجابية 0.4 و 1.05 و 1.37 عند 0.5 µm و 1.3 µm و 1.7 µm على التتالي .

7 ـ 6 ـ i=188 nA و v تساوي 9.4 µV و 188 µV و 188 mV .

7 ـ 7 ـ i=48 nA و v تساوي 2.4 mV و 48 mV و 48 V .

7 ـ 8 ـ طول الموجة :

$$\lambda = \frac{1.98 \times 10^{-25}}{\text{طاقة ثغرة النطاق}}$$

7 ـ 9 ـ أ ـ $W_g = 1.76 \times 10^{-19}$ J

ب ـ $W_g = 1.07 \times 10^{-12}$ J

7 ـ 10 ـ $3.84\ nA$ و 0.96 و 0.24 و $I_D=0.06$ عند :

$T = 25,\ 45,\ 65,\ 85\ °C$

على التالي .

7 ـ 11 ـ $P = 286\ nW$ أو $-35.4\ dBm$.

7 ـ 12 ـ

ب ـ معادلة خط الحمل : $10 + \upsilon_d + 2 \times 10^6\ i_d = 0$

ت ـ $\upsilon = 0.5 \times 10^6\ P$

ث ـ $P_{sat.} = 20\ \mu W$

7 ـ 13 ـ

أ ـ $f = 583\ MHz$

ب ـ $R_L = 11.4\ \Omega$

ت ـ $f = 2.7\ MHz$

7 ـ 14 ـ الاستجابية $53\ A/W$ و $P=0.38\ nW$ أو $-64\ dBm$.

7 ـ 15 ـ الاستجابية $8.7\ A/W$ و $P=2.3\ nW$ أو $-56\ dBm$.

الفصل الثامن

8 ـ 2 ـ الأجوبة معطاة على الشكل (8 ـ 3) .

8 ـ 3 ـ $d/2a = 0.8054$.

8 ـ 4 ـ $d/w = 1.52$ و $d/2a = 0.826$.

8 ـ 5 ـ $d = 1.7\ \mu m$.

8 ـ 6 ـ $I/I_0 = 0.19$.

8 ـ 7 ـ نتائج عيّنات [(الزاوية بالدرجات) و(الخسارة بالديسيبل)] :

[1, 0.248)] ، [5 , 1.14] و [10, 3.52]

8 ـ 8 ـ الرسم البياني ذاته لكلا طولي الموجتين . نتائج عيّنات [(الزاوية بالدرجات) ، و(الخسارة بالديسيبل)] :

[1, 0.845] و [2, 3.28] و [2, 13.53]

8 ـ 10 ـ عند $\lambda=1\ \mu m$: $w=4.62\ \mu m$ وخسارة 0.2 dB .
وعند $\lambda=1.6\ \mu m$: و $w=6.46\ \mu m$ وخسارة 0.1 dB .
8 ـ 11 ـ نتائج عيّنات [(الفاصل بالميكرومتر) و(الخسارة بالديسيبل)] :
عند $\lambda=0.8\ \mu m$: [50, 0.215] و [200, 2.59] و [500, 7.84] .
وعند $\lambda=1.3\ \mu m$: [50, 0.083] و [200, 1.17] و [500, 4.66] .
8 ـ 12 ـ الطول البؤري 5.1 mm و $d=398\ \mu m$.
8 ـ 13 ـ

$NA=0.2$: $P=0.2$ mW, 0.08 mW, 0.00002 mW

$NA=0.5$: $P=1.1$ mW, 1.25×10^{-50} mW, 1.25×10^{-500} mW

8 ـ 14 ـ $(m-1)\ NA^2 \leqslant 0.4$.
8 ـ 15 ـ الكفاءة 8٪ تقريباً .

الفصل التاسع

9 ـ 1 ـ أ ـ 4/5 و 1/5 وصفر .ـ
ب ـ $L_{THP}=0.97$ dB و $L_{TAP}=6.99$ dB و $L_E=L_d=\infty$.
9 ـ 2 ـ أ ـ 0.504 و 0.126 و 0.0001 .
ب ـ $L_{THP}=2.97$ dB و $L_{TAP}=8.99$ dB .
ث ـ $L_E = 2$ dB .
9 ـ 3 ـ 6 dB .
9 ـ 4 ـ 17.8 dB .
9 ـ 5 ـ L = 9 dB, 12 dB, 15 dB, 15 dB .
9 ـ 6 ـ L = 10.9 dB, 11.38 dB, 11.84 dB, 11.84 dB .
ويعتمد القارن الأفضل على نوع التطبيق .
9 ـ 7 ـ حل واحد يستعمل مجموعة من الموصلات والوصلات الدائمة يعطي الخسارات التالية : 19.2 dB و 27.6 dB و 36 dB و 39.7 dB .

9 ـ 8 ـ $L = 6.99\ dB$.

9 ـ 9 ـ $L = 17.99\ dB$ إلى الأطراف 2 و3 و4 .

و $L = 15.2\ dB$ إلى الطرف 5 .

9 ـ 10 ـ نتائج عيّنة (عدد النهايات ، الخسارة بالديسيبل) : [3, 9.39] ، [10, 14.6] ، [15, 16.4] ، [20, 17.6] .

9 ـ 11 ـ $d = 23.1\ \mu m$.

9 ـ 12 ـ $d = 231$.

9 ـ 14 ـ $L = 9\ dB,\ 12\ dB,\ 15\ dB,\ 15\ dB$

9 ـ 15 ـ $L = 30\ dB,\ 20.92\ dB,\ 21.38\ dB,\ 21.38\ dB$

الفصل العاشر

10 ـ 1 ـ (ب) ـ $m' = 0.6$

(ت) ـ $P = 5+2.68 \cos \omega t\ (mW)$

(ث) ـ $m = 0.54$

10 ـ 2 ـ (أ) ـ $m'=0.6$ و $P=5+2.12 \cos \omega t\ (mW)$ و $m=0.42$

(ب) ـ $m'=0.6$ و $P=5+1.66 \cos \omega t\ (mW)$ و $m=0.33$

10 ـ 3 ـ (أ) ـ $R_e = 87\ \Omega$

(ب) ـ $\upsilon_{CE} = 3.9\ V$

(ت) ـ $m = 0.84$

10 ـ 4 ـ $a_2 = 0.000158\ mW/(mA)^2$

10 ـ 5 ـ $I_C = 96.7\ mA$ و $I_B = 1.93\ mA$

10 ـ 6 ـ عرض النطاق يساوي 1.07 MHz .

10 ـ 7 ـ عرض النطاق يساوي 0.8 MHz لترميز ثماني البتّات .

10 ـ 8 ـ عرض النطاق يساوي 19.8 MHz .

10 ـ 9 ـ عرض النطاق يساوي 72 MHz .

10 ـ 10 ـ عرض النطاق يساوي 1152 MHz لترميز RZ ثماني البتّات .
10 ـ 11 ـ معادلة تيار الدخل كما يلي :

$$i = 50 + 16.7 \, [(1+0.5 \cos\omega_m t)\cos \omega_{SC1} t + (1+0.5 \cos \omega_m t) \cos \omega_{SC2} t]$$

m هو تردد التعديل و ω_{SC1} و ω_{SC2} هما ترددي الحامل الفرعي .
10 ـ 13 ـ إذا كان جهد المنبع هو 5 V ستكون مقاومة الحمل لدارة مناسبة مساوية 45 Ω وتيارات قيادة للترانزستور أكبر من 1.6 mA .

الفصل الحادي عشر

11 ـ 1 ـ (أ) ـ i_{NT} (rms) = 45.2 nA
(ب) ـ υ_{NT} (rms) = 2.26 μV و P_{NT} = 0.1 pW
(ت) ـ i_{NT} (rms) = 1.43 nA, υ_{NT} (rms) = 71.4 μV
و P_{NT} = 0.1 pW
11 ـ 2 ـ (أ) ـ i_{NS} (rms) = 43.8 pA
(ب) ـ υ_S = 50 nV, υ_{NS} (rms) = 2.19 nV
(ث) ـ SNR = 520 = 27 dB
(ث) ـ SNR = 5×10^{-6} = −33 dB !
11 ـ 3 ـ P = 10 nW .
11 ـ 4 ـ (أ) ـ 54 μW
(ب) ـ SNR = 8.43×10^5 = 59.3 dB
(ت) ـ P_{NS} = 864 fW
11 ـ 5 ـ (أ) ـ P = 1.4 nW
(ب) ـ SNR = 5.67×10^5 = 57.5 dB
(ت) ـ P_{NS} = 864 fW

11 ـ 6 ـ (أ) ـ $SNR = 1.51 = 1.79\ dB$

(ب) ـ $SNR = 1.79\ dB$

(ت) ـ $SNR = 3125 = 34.9\ dB$

(ث) ـ $M = 31$

11 ـ 7 ـ (ب) ـ $P = 607\ nW$

(ت) ـ $P = 60.7\ nW$

11 ـ 8 ـ $P = 132.7\ \mu W$

11 ـ 9 ـ (أ) ـ $P_{LO} = 4\ mW$

(ب) ـ $P = 2\ \mu W$

11 ـ 11 ـ (أ) ـ $SNR = 21.6\ dB$

(ب) ـ $P = 5.2\ \mu W$

(ت) ـ 87, 800 photons/bit

11 ـ 12 ـ (أ) ـ 1.8 nW

(ب) ـ 23 photons/bit

(ت) ـ ان النظام المحدود بضجيج الطلقات يتطلب قدرة أقل بكثير .

(ث) ـ استعمل ثنائياً ضوئياً جرفياً (APD) .

11 ـ 13 ـ (أ) ـ $P = 6.25\ pW$

(ب) ـ $P = 50\ pW$

(ت) ـ $P_{NT} = 16.6\ fW$

(ث) ـ $P_{NT} = 264\ fW$

(ج) ـ $T_A = 300\ k$

(ح) ـ $P = 33.2\ fW$

(خ) ـ $SNR = 376 = 25.8\ dB$

(د) ـ $SNR = 188 = 22.8\ dB$

11 ـ 14 ـ (أ) ـ $f = 8.84\ MHz$

(ب) ـ $t_r = 39.6\ ns$

11 ـ 15 ـ (أ) ـ $f = 17.7\ \text{MHz}$

(ب) ـ $t_r = 19.8\ \text{ns}$

11 ـ 18 ـ (أ) ـ $2.5\ \text{mV}$

(ب) ـ $f = 79.6\ \text{MHz}$

(ت) ـ $i_{NT}\ (\text{rms}) = 11.5\ \text{nA}$

(ت) ـ $i = 0.25\ \mu\text{A}$

(ث) ـ $\text{SNR} = 185 = 22.7\ \text{dB}$

الفصل الثاني عشر

إن مسائل التصميم في هذا الفصل ليس لها حلول وحيدة .

ترجمة المصطلحات والتعابير الواردة في الكتاب وفق المعنى الذي وردت به

A

Aberration	زيغ
aberration loss	خسارة الزيغ
aberration of light	زيغ الضوء
Abrasive	كاشط
abrasive paper	ورق كاشط
Absolute	مطلق
absolute temperature	درجة الحرارة المطلقة
Absorption	امتصاص
Acceptance	قبول
acceptance angle	زاوية القبول
acceptance cone	مخروط القبول
Acoustic	صوتي

Alignement	تراصف
alternating current (A.C.)	تيار متناوب
Alternating	متناوب
A.C. coupling	اقتران تيار متناوب
Amplify	يكبر
signal amplification	تكبير الإشارة
Analog	تماثلي
analog modulation	تعديل تماثلي
analog signal	إشارة تماثلية
Angle	زاوية
viewing angle	زاوية الرؤية
critical angle	الزاوية الحرجة
divergence angle	زاوية التباعد
angular dispersion	التشتيت الزاوي
Anode	مصعَد
Antireflection	مضاد للانعكاس
Aperture	فتحة النفوذ
numerical aperture	فتحة النفوذ العددية
Apex	قمة / رأس
Approximate	مقارب
approximate sinusoid	جيبي مقارب
Area	مساحة
area mismatch loss	خسارة عدم التواؤم المساحي
Array	صفيف
array connector	موصل صفيفي
Attenuation	تخامد

spectral attenuation	التخامد الطيفي
preferential attenuation	التخامد التفضيلي
Audio	سمعي
audio wave	موجة سمعية
audio message	رسالة سمعية
Automatic	آلي
automatic gain control	التحكم الآلي بالربح
Avalanche	جرفي
avalanche multiplicaion	التضاعف الجرفي
avalanche photodiode	ثنائي ضوئي جرفي
Avergae	متوسط / وسطي
average time	الزمن الوسطي

B

Background	خلفية
Band	نطاق
band gap	ثغرة النطاق
band width	عرض النطاق
baseband	النطاق الأساس
baseband bandwidth	عرض النطاق الأساس
valence band	نطاق التكافؤ
combination band	نطاق مركب
Barrier	حاجز
energy barrier	حاجز الطاقة
Base	قاعدة /للترانزستور/
base current	تيار القاعدة

Beam	حزمة
collimated beam	حزمة متوازية
convergent beam	حزمة متقاربة
divergent beam	حزمة متباعدة
Bias	انحياز
bias voltage	جهد انحياز
forward biased	منحاز أمامياً
Binary	ثنائي
Bipolar	ثنائي القطبية
bipolar transistor	ترانزستور ثنائي القطبية
Bit	بتّة
bit rate	معدل البتّات
data bits	بتّات المعطيات
Blazed	برّاق
blazed reflection grating	محزّز انعكاس برّاق
Blincker	وامض / متقطع
blincker light	ضوء وامض
Block	كتلة
block diagram	مخطط كتلي
Bombardment	قصف
ion bombardment	قصد أيوني
Bond	رابطة
chemical bonds	روابط كيميائية
Bound	مقيّد
bound electron	الكترون مقيد
Boundary	حد فصل / حد فاصل

Branch state — حالة تفرع

Braiding — تجديل / جديلة

Broadcast — يذيع

broadcast television — تلفزيون يستقبل الإشارة عن طريق الهوائي

Bus — خط رئيسي

data bus — خط معطيات رئيسي

Butt — تناكب /يوصل طرفي الشيء بالتناكب/

butt joint — وصلة تناكبية

By-pass — تجاوز / تبديل

by-pass capacitor — مكثف تجاوز

by-pass switch — مفتاح تبديل

C

Cable — كابل

cable television — تلفزيون كابلي

(تلفزيون يستقبل الإشـارة عن طريق كابل)

Call — مكالمة هاتفية / نداء

Capacity — سعة / امكانية

stray capacitance — سعة شاردة

Carrier — حامل

carrier lifetime — مدة حياة الحامل

Cathode — مهبط

Cavity — تجويف

cavity resonance — طنين التجويف

laser cavity — تجويف ليزري

Channel	قنـاة
information channel	قناة معلومات
Characteristics	خواص
Charge	شحنة
electron charge	شحنة الالكترون
Chip	رقاقة
Circuit	دارة
Cladding	كساء /إكساء
cladding mode	أسلوب الاكساء / أسلوب كسائي
Class	صنف
calss A amplification	تكبير ذو الصنف أ
Cleave	يشق
Clock	ساعة / ميقاتية
clock rate	معدل الميقاتية
Code	رمـز
coding	ترميز
Coefficient	مَعامِل
reflection coefficient	معامل الانعكاس
Coherent	متهاسك
coherent source	منبع متهاسك
Collector	مجمّـع
Collimate	يوازي
collimated beam	حزمة متوازية
collimator lens	عدسة توازي
collimator rod	قضيب توازي
Compatible	منسجم

Compliant	لين / مطاوع
compliant plastic	بلاستيك لين
Computer	حاسوب
Concave	مقعر
concave mirror	مرآة مقعرة
Condenser	مكثف
Conduction	توصيل
conduction band	نطاق التوصيل
conductor	موصل
conductance	توصيلية / ناقلية
Confine	يقيد / يحصر
confined emission	انبعاث مقيّد
Contact	تماس
Continuous	مستمر / متواصل
continuous wave	موجة مستمرة
Contrast	تباين
Control	يتحكم / تحكُّم
control circuit	دارة تحكم
Converge	يتقارب
converging rays	أشعة متقاربة
Converter	مبدِّل
Coordinates	احداثيات
Core	نواة
core mode	أسلوب النواة
Corrugate	يموِّج
corrugated aluminium sheath	غلاف ألومنيومي مموّج

Crosstalk	لغط
Crystallyne	يبلّر / بلّوري
crystallyne planes	مستويات بلّورية
Couple, Coupler, Coupling	يقرن ، قارن ، اقتران
coupling ratio	نسبة الاقتران
trapered coupler	قارن مستدق
directional coupler	قارن اتجاهي
surface coupler	قارن سطحي
edge coupling	الاقتران الحافي
grating coupling	الاقتران المحزّز
source coupling	اقتران المنبع
Current	تيار
driving current	التيار القائد
Curvature	تقوُّس
Cutoff	قَطْع
cutoff frequency	تردد القطع
Cycle	دورة

D

Dark	ظلام
dark current	تيار الظلام
Data	معطيات
data rate	معدل المعطيات
data bus	خط معطيات رئيسي
data handling system	نظام تداول المعطيات

Decay	يضمحل
Decision	قرار
decision circuits	دارات قرار
Degrade	يتردى / يتدنى
signal degradation	تدني جودة الإشارة
Delay	تأخير
delay line	خط تأخير
Demodulate	يزيل التعديل
Demultiplex	يفرز / يفصل
Depletion	فقيرة
depletion region	المنطقة الفقيرة
Deposition	تراكم
vapour deposition	تراكم بخاري
Detector	مكشاف
light detector	مكشاف ضوئي
cherent detection	كشف متماسك
Deviation	انحراف
frequency deviation	انحراف التردد
Device	جهاز / أداة
Dichromate	ثنائي اللون
dichromated layer	طبقة ثنائية اللون
Dielectric	عازل
Differenciate	يفاضل
Diffraction	انعراج
diffraction grating	محزز الانعراج
Diffuse	يبعثر

diffuse reflections	انعكاسات مبعثرة
Digit	رقم
digital system	نظام رقمي
Direct	مباشر
direct current	تيار مستمر
directional	اتجاهي
directional coupler	قارن اتجاهي
directionality	اتجاهية
Discontinuity	انقطاع / استمرارية
impedance discontinuity	انقطاع المانعة
Dispersion	تشتيت
angular dispersion	التشتيت الزاوي
material dispersion	تشتيت المادة
waveguide dispersion	تشتيت دليل الموجة
Distortion	تشوه
signal distortion	تشوه الإشارة
Distribution	توزيع
distribution network	شبكة توزيع
Divergence	تباعد
divergence angle	زاوية التباعد
diverging rays	أشعة متباعدة
diverging source	منبع متباعد
Dope	يطعّم
Dopant	مادة التطعيم
doped- deposited - silica	سيليكا مطعّمة بالتراكم
Drop	هبوط
voltage drop	هبوط الجهد

Duplex	مزدوج
Duration	دوام / مدة
pulse duration	مدة النبضة / عرض النبضة
Duty cycle	كفاءة الدور / دورة التشغيل
Dynode	مصعد جانبي

E

Edge	حافة
edge encoder	مرمِّز حافّي
edge emitting diode	ثنائي باعث حافي
edge emitters	باعثات حافية
Efficiency	كفاءة
Electron	الكترون / كهروب
photoelectron	الكترون ضوئي /كهروب ضوئي
Emission	انبعاث / بث
stimulated emission	انبعاث مثار
spontaneous emission	انبعاث تلقائي
confined emission	انبعاث مقيّد
Emitter	باعث
light emitting diode (LED)	ثنائي باعث للضوء
emitter follower	تابع باعثي
Encoder	مرمِّز
Energy	طاقة
energy level	سوية الطاقة
energy barrier	حاجز الطاقة
gap energy	طاقة الثغرة
energized electromagnet	مغناطيس كهربائي منشّط

Enhance	يعزِّز
Equalizer	دارة تسوية / مسوٍّ
Equivalent	مكافىء
Error	خطأ
error rate	معدل الخطأ
Etched	محفور
Evanescent	سريع الزوال
evanescent field	حقل سريع الزوال
Excited	مهيّج
excited state	الحالة المهيّجة
Excess	زائد / فائض
excess noise	ضجيج فائض / زائد
excess loss	خسارة زائدة / فائضة
Excursion	تأرجح

F

Factor	عامل
propagation factor	عامل الانتشار
modulation factor	عامل التعديل
Feedback	تغذية راجعة
Ferrule	طوق
Fiber	ليف
glass fiber	ليف زجاجي
fiber system	نظام ليفي
fiber optics	بصريات الليف

fiber link	وصلة ليفية
fibered city	مدينة مليّفة / مدينة تستخدم الألياف في اتصالاتها الداخلية
Filter	**مرشاح**
low pass filter	مرشاح تمرير منخفض
optic filter	مرشاح بصري
Flint	**صوان**
flint glass	زجاج صوّاني
Flared	**قمعي / بوقي**
flared openings	فتحات قمعية
Fluctuation	**تراوح**
Focus, focusing	**بؤرة ، تبئير**
Format	**صيغة**
analog format	صيغة تماثلية
optic format	صيغة بصرية
Frame	**إطار / رتل**
frame rate	معدل الأطر / الأرتال
Free	**حر**
free space	الفراغ الحر
Frequency	**تردد**
normalized frequency	التردد المقيّس
intermediate frequency	التردد المتوسط
frequency shift	إزاحة التردد
frequency deviation	انحراف التردد
Front - end	**المقدّمة**
Function	**تابع**

function work	تابع العمل
Fundamental	أساس / جوهر
fundamental frequency	التردد الأساسي
Fuzzy	غائم / ضبابي
fuzzy picture	صورة غائمة

G

Gain	ربح
autamatic gain control	التحكم الآلي بالربح
Gap	ثغرة
gap energy	طاقة الثغرة
band gap	ثغرة النطاق
Graded	متدرج
graded index (GRIN)	الدليل المتدرج
GRIN fiber	الليف ذو الدليل المتدرج
Grating	محزَّز
grating multiplexer	محزَّز مجمِّع
diffraction grating	محزَّز الانعراج
grating coupling	اقتران محزّز
phase grating	محزّز طوري
bar grating	محزّز قضيبي
blazed reflection grating	محزّز انعكاس برّاق
Gravitation	الجاذبية الأرضية
gravitational acceleration	تسارع الجاذبية الأرضية
Groove	أخدود
Guide	دليل

guiding layer	طبقة موجِّهة
guided channel	قناة موجَّهة
waveguide	دليل موْجة

H

Harmonic	توافقية
harmonic distortion	تشويه التوافقيات
total harmonic distortion (THD)	تشويه التوافقيات الكلي
	التوافقيات الكلي
Hetero	غير متماثل / مختلف
heterojunction	وصلة غير متماثلة / غير متجانسة /
heterodyne	متعلق باقتران ترددين مختلفين (نظام هيترواديني)
Homo	متماثل
homojunction	وصلة متماثلة / متجانسة /
Hybrid	هجيني
Hydrolysis	التحليل المائي

I

Image	صورة
imaging system	نظام تصوير
Impedance	ممانعة
transimpedance	ممانعة عابرة
Impurity	شائبة
Index	دليل

modulation index	دليل التعديل
refractive index	دليل الانكسار
index matching	مواءمة الدليل
Information	معلومات
information capacity	سعة المعلومات
Insertion	ادخال
insertion loss	خسارة الادخال
Integrate	يكامل
intergated optics	بصريات متكاملة
Intensity	شدة
Interface	سطح بيني
Interference	تداخل
interference pattern	نمط التداخل
destructive interference	تداخل تهديمي
Irradiance	سطوع
Isolate	يعزل

J

Jacket	غلاف واقٍ
Junction	وصلة
semiconductor junction	وصلة نصف ناقل
junction photodiode	ثنائي ضوئي ذو الوصلة

K

Keyboard	لوحة مفاتيح
Keying	ابراق
on-off keying (OOK)	ابراق بالوصل والقطع
phase shift keying (PSK)	ابراق بإزاحة الطور
frequency shift keying (FSK)	ابراق بإزاحة التردد
Kinetic	حركي
kinetic energy	طاقة حركية
Lap	صقل
lap and polish	صقل وتلميع
Lazer	ليزر
lazer diode	ثنائي ليزري
Leakage	تسرب
leakage current	تيار التسرب
Lens	عدسة
lensed connector	موصل عدسي
lens-coupled fiber	ليف ذو اقتران عدسي
Level	سوية
power level	سوية القدرة
Light	ضوء
light detector	مكشاف ضوئي
Linearity	خطية
Link	وصلة
telephon link	وصلة هاتفية
Load	حِمْل

load line	خط الحمل
Lock - in	انحباس
lock-in phenomenon	ظاهرة الانحباس
Loss	خسارة
bending loss	خسارة الانحناء
coupling loss	خسارة الاقتران
tap loss	خسارة التفرع
excess loss	الخسارة الفائضة / الزائدة
insertion loss	خسارة الادخال
aberration loss	خسارة الزيغ
area mismatch loss	خسارة عدم التواؤم المساحي
lossy material	مادة فاقدة

M

Macroscopic	يرى بالعين المجردة
Magnification	تضخيم
Mandrel	عمود دوران المخرطة
Match	يوائم
Mate	يعشق
mated connector	موصل معشّق
rematable attatchments	أربطة يمكن إعادة تعشيقها
Mechanism	آلية
Message	رسالة
audio message	رسالة سمعية
Microprocessor	معالج ميكروي

Mode	أسلوب
mode mixing	اختلاط الأسلوب
mode chart	خريطة الأسلوب
mode energy	طاقة الأسلوب
odd modes	أساليب فردية
modal distoration	تشوه ظاهري
propagating mode	أسلوب منتشر
hybrid mode	أسلوب هجين
Modeling	نمذجة / محاكاة
Modulate	يعدّل
voice-modulated mirror	مرآة معدّلة صوتياً
modulation	تعديل
modulation factor	عامل التعديل
phase modulation	تعديل طوري
frequency modulation	تعديل ترددي
pulse position modulation	تعديل موقع النبضة
intensity modulation	تعديل الشدة
amplitude modulation	تعديل الاتساع
pulse duration modulation	تعديل مدة النبضة
pulse code modulation	تعديل نبضي مرمَّز
analog modulation	تعديل تماثلي
digital modulation	تعديل رقمي
refractive idex modulation	تعديل دليل الانكسار
Monochromator	وحيد اللون
Monolitic	متراص
monolitic photodiode	ثنائي ضوئي متراص

Multiplexing التجميع

frequency division multiplexing (FDM) تجميع التقسيم الترددي

wavelength division multiplexing تجميع التقسيم حسب طول الموجة

wavelength multiplexed systems

الأنظمة المجمّعة حسب طول الموجة

grating multiplexer محزّز مجمِّع

N

noise ضجيج

noise figure رقم الضجيج

shot noise ضجيج الطلقات

excess noise الضجيج الفائض/ الزائد

modal noise ضجيج الأساليب

noise equivalent power (NEP) القدرة المكافئة للضجيج

thermal noise الضجيج الحراري

Normalized مقيّس

normalized frequency تردد مقيّس

Numerical عددي

numerical aperture فتحة النفوذ العددية

O

Offset انزياح / تخالف

Operate يعمل

operating current تيار العمل

operating characteristics خواص العمل

Optics	بصريات
fiber optics	بصريات الليف
optic fibers	الألياف البصرية
integrated optics	البصريات المتكاملة
Orbit	مدار
Oscillate	يتذبذب
R.F. oscillator	متذبذب تردد راديوي
Overlap	متراكب
overlap connector	موصل متراكب
Overtone	توافقية
overtone band	نطاق التوافقيات
Output	خرْج / مخرج
output spectrum	طيف الخرج

P

Package	عبوة
dual-in-line package	عبوة مزدوجة الخط
Parameter	مَعْلمة
Parasitic	طفيلي
parasitic capacitance	سعة طفيلية
Particle	جسيم
Passband	نطاق مرور
Pattern	نمط
radiation pattern	نمط الإشعاع
speckle pattern	نمط البقع
interference pattern	نمط تداخل

Peak	ذروة / قمة
peak power	القدرة عند القمة
peak excursion	تأرجح القمة
periodical	دوري
Phase	طور
phase defference	فرق الطور
Photon	فوتون
photodiode	ثنائي ضوئي
photodetector	مكشاف ضوئي
photoelectron	الكترون ضوئي
photolithography	الطباعة بالتصوير الضوئي
photomultiplier	مضاعف ضوئي
Piezoelectric	كهرضغطي
peizoelectric effect	تأثير كهرضغطي
Pitch	خطوة
quarter-pitch lens	عدسة ربعية الخطوة
Plane	مستوى
plane wave	موجة مستوية
planar surface	سطح مستوٍ
Polarization	استقطاب
polarity	قطبية
Polish	تلميع
lap and polish	صقل وتلميع
Potential	كمون / كامن
potential difference	فرق كمون
potential energy	طاقة كامنة

potential energy barrier	حاجز طاقة كموني
Preferential	تفضيلي
preferential attenuation	تخامد تفضيلي
Preform	تشكيلة أولية
Prism	موشور
sliding prism	موشور منزلق
Profile	منظر جانبي
Propagation	انتشار
propagation factor	عامل الانتشار
Pulse	نبضة
pulse train	قطار / سلسلة / نبضات
pulsed lazer	ليزر منبّض

Q

Quantum	كَمْ
quantum limited	محدود بالكَمْ
quantum efficiency	كفاءة الكَمْ
Quantize	يكمي

R

Radian	راديان
Radiation	اشعاع
radiation pattern	نمط الاشعاع
Radiator	مُشِعْ

Radio	راديو
radio frequency (R.F.)	تردد راديوي
R.F. sputtering	الذر بالتردد الراديوي
Random	عشوائي
Rate	معدّل
bit error rate (BER)	معدل خطأ البتّات
bit rate	معدل البتّات
data rate	معدل المعطيات
Ratio	نسبة
coupling ratio	نسبة الاقتران
splitting ratio	نسبة الانشطار
Ray	شعاع
tapered ray	شعاع محصور
Reactance	مفاعَلة
Receptacle	مقبس
Recombine	يتحد / يجمع
recombination region	منطقة الاتحاد
stimulated recombination	اتحاد مثار
Redundancy	زيادة عن الحاجة / فيضية /
redundant information	معلومات فائضة
Reflection	انعكاس
reflection angle	زاوية الانعكاس
reflectance	انعكاسية
Refraction	انكسار
refraction angle	زاوية الانكسار
refractive index	دليل الانكسار

Reliability	موثوقية / وثوقية / اعتمادية
Repeater	مكـرِّر
Representative	تمثيلي
Reproducibility	تكرارية معيارية
Resistance	مقاومة
Resonance	طنين
resonance frequency	تردد الطنين
Response	استجابة
response curve	منحنى الاستجابة
responsivity	استجابية
Restrictions	قيود

S

Sample	عيّنة
sampling	اعتيان
samplinge rate	معدل الاعتيان
Sandwitching	تصفيف
Satellite	ساتل
Scale	مقياس
scale factor	عامل المقياس
Scatter	ينثر / يتناثر
scattering obgects	أجسام ناثرة
Scribe	خدش
scribe and break	الخدش والقطع
Semiconductor	نصف ناقل
semiconductor junction	وصلة نصف ناقلة

Sensor	محساس
Shell	مدار
electron shell	مدار الكتروني
Shift	انزياح / إزاحة
phase shift	إزاحة الطور
Shielding	تحجيب
Shot	طلقة
shot noise	ضجيج الطلقات
Signal	إشارة
signal -to- noise ratio	نسبة الإشارة إلى الضجيج
Signalling	التشوير
signalling pulses	نبضات التشوير
signalling rate	معدّل التشوير
signal processing	معالجة الإشارة
Simplex	مفرد الإرسال / إرسال وحيد الاتجاه /
Sinking	طرْح
heat sinking	الطرح الحراري
Sinter	يتلبد
Sinusoid	جيبي
Skew	منحرف
skew rays	أشعة منحرفة
Slab	طبقة
slab waveguide	دليل موجة طبقي
Sleeve	جلبة
precision sleeve	جلبة ضبط
Slot	شِـقْ
time slot	الشق الزمني

Solid	صلب
solid state	الحالة الصلبة
Source	منبع / مصدر
Space	فراغ / حيز / فضاء
free space	الفراغ الحر
empty space	الخلاء
Speaker	مجهار
Speckle	بقعة / لطخة
speckle pattern	نمط البقع
Spectrum	طيف
spectrum analysis	تحليل الطيف
spectral	طيفي
spectral width	العرض الطيفي
spectral response	الاستجابة الطيفية
Spin	يغزل /مغزل/
Splice	وصل دائم / غير مؤقت
Adhesive splicing	الوصل الدائم باللصق
splices and connectors	وصلات دائمة وموصلات
Split	يشطر
splitting ratio	نسبة الانشطار
beam splitting plate	صفيحة شطر الحزمة
beam splitting cube	مكعب شطر الحزمة
Spontaneous	تلقائي
spontaneous emission	انبعاث تلقائي
Spool	ملف
Spot	بقعة

Spread	انبساط
pulse spread	انبساط النبضة
modal spread	الانبساط الظاهري
beam spread	انبساط الحزمة
wave length spread	انبساط طول الموجة
frequency spread	انبساط التردد
Stable	مستقر
State	حالة
ground state	حالة أرضية
excited state	حالة مهيّجة
Standard	معياري
Step	درجة / قفزة
step signal	إشارة قفزة
step- index fiber	ليف ذو دليل درجي
Stimulated	مثار
stimulated emission	انبعاث مثار
stimulated photon	فوتون مثار
stimulated recombination	اتحاد مثار
Stray	شارد
stray capacitance	سعة شاردة
Stripe	شريط
stripe contact	تماس شريطي
stripe contact laser diode	ثنائي ليزري ذو تماس شريطي
Subcarrier	حامل فرعي
Substrate	طبقة تحتية
Surface	سطح

surface emitters باعثات سطحيه

planar surface سطح مستوي

Switch مفتاح

electro-optic switch مفتاح كهربصري

switching speed سرعة التبديل

switching mechansism آلية التبديل

Symmetric متناظر

Synchronize يزامن

T

Tap تفرُّع / تفريع

tap loss خسارة التفرع / التفريع

Tapered مُستدق

tapered coupler قارن مستدق

Technical تقني

Technology تكنولوجيا / تقانة

Television تلفزيون

cable television تلفزيون يستقبل الإشارة عن طريق كابل

boadcast television تلفزيون يستقبل الإشارة عن طريق الهوائي

Tensile شَـدْ

tensile strength قوة الشد

Terminal مطراف / نهاية

Thermo - حراري

thermoelectric كهرحراري.

thermistor مقاومة حرارية /ثيرمستور/

Threshold	**عتبة**
threshold current	تيار العتبة
Tilt	**انحدار**
tilt angle	زاوية الانحدار
Tone	**نغمة**
Transducer	**مبدل طاقة**
Transfer	**نقــل**
transfer characteristics	خواص النقل
Transistor	**ترانزستور**
Transit	**عبور**
transit time	زمن العبور
transition	انتقال
transition metal ions	أيونات العبور للمعدن
transimpedance	ممانعة عابرة
Transverse	**عرضي**
transverse magnetic polarization	استقطاب مغناطيسي عرضي
transverse mode	أسلوب عرضي
Trunk	**وصلة طويلة**
Tube	**أنبوب**
loose- tube- cable	كابل ذو أنبوب غير مقيد
fiber cable	كابل ليفي
photo emissive tube	أنبوب باعث ضوئي
Tune	**يولّـف**
tuned amplifier	مكبّر مولّف
Type	**نوع**
typical	نموذجي

U

Unbounded	غير مقيد / غير محدد
unbounded medium	وسط غير محدد
Uniform	منتظم
unifrom plane wave	موجة مستوية منتظمة
Unipolar	وحيد القطبية

V

Vaccum	تفريغ
vaccum evaporation	التبخير بالتفريغ
Valence	تكافؤ
valence band	نطاق التكافؤ
Vibration	اهتزاز
Video	ڤيديو
video signal	إشارة ڤيديوية
Viewing	رؤية
viewing angle	زاوية الرؤية
viewing direction	اتجاه الرؤية
Voltage	جهد
voltage drop	هبوط الجهد

W

Wave	موجة
waveguide	دليل موجة
wavenumber	العدد الموجي

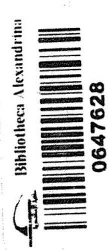
الفهرس

الصفحة

رقم الصفحة	الخطأ	الصواب
95 المعادلة (2 ـ 13)	— — —	المعادلة (2 ـ 13) $NA = \sin \Theta$
98 المعادلة (2 ـ 15)	$I = I_0 e^{-r^2/w^2}$	$I = I_0 e^{-2 r^2/w^2}$
109 المعادلة (3 ـ 6)	$k = \frac{0.2\pi}{\lambda}$	$k = \frac{2\pi}{\lambda}$
123 رقم المعادلة	(5 ـ 19)	(19 − 3)
126 الجدول (3 ـ 2)	$\frac{\text{بصري}}{f_{3-dB} \times L}$	$\frac{\text{بصري}}{f_{3-dB} \times L}$ GHz × km
146 المعادلة (3 ـ 19)	$f_{3-dB} = \frac{0.35}{\Delta (\tau/L)}$	$f_{3\times dB} \times L = \frac{0.35}{\Delta(\tau/L)}$
197 المعادلة (5-3-a)	$n(r) = n_1 \sqrt{[1-2\ r/a)^\alpha\ \Delta]}$	$n(r) = n_1 \sqrt{[1-2\ (r/a)^\alpha\ \Delta]}$
216 السطر 4	$\alpha = (k_0\ n_1/\alpha)^{1/2}$	$\alpha = (k_0\ n_1/a)^{1/2}$
234 الشكل (5 ـ 28)	فرن تحريض RT	فرن تحريض RF
246 الجدول (5 ـ 2)	80	800
254 السطر 3	الالكترونيات	الالكترونات
299 السطر 5	$\rho = \frac{}{(0.63}$	$\rho = \frac{}{(6.63}$
314 السطر 15	المقاومة المحددة	المعادلة المحددة
السطر 18	$= (2\pi\ R_L\ Cd)^{-11}$	$= (2\pi\ R_L\ Cd)^{-1}$

رقم الصفحة		الخطـأ	الصـواب
321	السطر 6	شكل (7 ـ 4)	جدول (7 ـ 4)
343	المعادلة (8 ـ 9)	$L = 10 \text{ Log } \frac{NA_2}{NA_1}$	$L = 10 \text{ Log } \frac{NA_2^2}{NA_1^2}$
368	الجدول (8 ـ 2)	التخامد	التخامد
		dB	dB/km
381	المعادلة (9 ـ 4)	$L_E = -10 \text{Log} \frac{P_2+P_1}{P_1}$	$L_E = -10 \text{ Log } \frac{P_2+P_3}{P_1}$
417	رقم المسألة	11 ـ 7	11 ـ 9
	رقم المسألة	15 ـ 6	15 ـ 9
537	السطر الاخير	$\tau =$	$\Delta \tau =$
539	السطر 3	1.6×10^{-9}	1.3×10^{-9}
542	رقم المعادلة	(8 ـ 12)	(9 − 12)





السعر 18 $ U.S أو ما يعادلها